

Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich
napjatosti a deformace

Comparison of two design variants of the spiral casing of the fan grinding mill from the point
of view of the state of stress and deformation

Student: Richard Klučka

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc

Ostrava 2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Richard Klučka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace

Comparison of Two Design Variants of the Spiral Casing of the Fan Grinding Mill from the Point of View of the State of Stress and Deformation

Zásady pro vypracování:

Zkoumaným technickým objektem je spirálová skřín ventilátorového mlýna. Technickým problémem je provedení napěťové a deformační analýzy

- stávající skříně s upravenými vraty,
- skříně podle nového konstrukčního návrhu.

K řešení technického problému má být použita metoda počítačového modelování.

Postup řešení :

- provedení analýzy spirálové skříně ventilátorového mlýna podle technické dokumentace a stanovení jejích podstatných vlastností z hlediska řešeného problému,
- sestavení výpočtového modelu,
- provedení výpočetních simulací,
- vyhodnocení výsledků a porovnání obou konstrukčních variant.

Seznam doporučené odborné literatury:

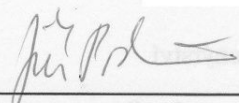
- [1] Technická dokumentace spirálové skříně ventilátorového mlýna
- [2] Němec, J., Dvořák, J., Hoschl, C. Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Praha 1989
- [3] Janíček, P., Ondráček, J., Vrbka, J. Mechanika těles - pružnost a pevnost I., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1987
- [4] Ondráček, J., Vrbka, J., Janíček, P. Mechanika těles - pružnost a pevnost II., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1988

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

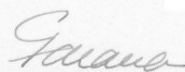
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.**

Datum zadání:

Datum odevzdání:



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Dovoluji si poděkovat panu prof. Ing. Jaroslavu Zapomělovi, DrSc. a kolektivu zaměstnanců společnosti Ivitas a.s. Jejich užitečné rady a doporučení výrazně přispěly ke vzniku této práce.

Richard Klučka

PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....

ANOTACE

Klučka Richard, *Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky – 337, 2010, 100 stran. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.

Diplomová práce se zabývá srovnáním dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich deformace a napjatosti. K řešení bylo využito počítačového modelování, konkrétně metoda konečných prvků s využitím principu submodelingu. V úvodu je popsána tvorba výpočtových modelů. Na základě analýz bylo zjištěno, že z hlediska posuvů jsou obě varianty téměř shodné. Rozdíl je v rozložení redukovaného napětí dle HMM a ve výskytu plastických deformací. Ze srovnání lépe vychází nově navrhovaná konstrukční varianta uvažující využití kluzných desek v dolní části skříně.

ANNOTATION

Klučka Richard, *Comparison of two design variants of the spiral casing of the fan grinding mill from the point of view of the state of stress and deformation: diploma thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics – 337. Supervisor: prof. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.

The diploma thesis deals with comparison of two design variants of the spiral casing of the fan grinding mill from the point of view of the state of stress and deformation. Computer modelling was used for solution. To be specific, it was the method of final elements with the use of sub-modelling principle. In the opening part of the thesis the creation of computation models is described. On the basis of analyses it was found out that both variants were almost the same in terms of shift. The difference lies in the distribution of reduced stress of HMM and in the occurrence of plastic deformations. What seems better concerning the comparison is the newly proposed design variant that considers the use of skid plates in the lower part of the casing.

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

A, B	Varianty konstrukčního provedení
x, y, z	Osy souřadného systému

Značka	Název veličiny	Jednotka
E	Modul pružnosti v tahu	<i>MPa</i>
E _T	Tečný modul pružnosti	<i>MPa</i>
F	Tíhová síla	<i>N</i>
K	Tuhost podloží	<i>Nm⁻³</i>
Re	Mez kluzu v tahu	<i>MPa</i>
T	Teplota	<i>°C</i>
f	Koeficient tření	-
g	Tíhové zrychlení	<i>ms⁻²</i>
m	Hmotnost	<i>kg</i>
α	Koeficient teplotní délkové roztažnosti	<i>K⁻¹</i>
α	Koeficient přestupu tepla	<i>Wm⁻²K⁻¹</i>
ε	Emisivita	-
λ	Měrná tepelná vodivost	<i>Wm⁻¹K⁻¹</i>
μ	Poissonovo číslo	-
ρ	Hustota	<i>kgm⁻³</i>

OBSAH

1. POPIS TECHNICKÉ SOUSTAVY.....	1
2. FORMULACE TECHNICKÉHO PROBLÉMU.....	9
2.1. Konstrukční varianta A.....	9
2.2. Konstrukční varianta B.....	9
2.3. Rozbor technické soustavy a postup řešení.....	10
3. KONSTRUKČNÍ VARIANTA A.....	11
3.1. Geometrický model.....	11
3.2. Materiálový model.....	13
3.2.1. Konstrukční ocel.....	13
3.2.2. Ušlechtilá ocel.....	15
3.2.3. Žárobeton.....	17
3.2.4. Asfalt.....	18
3.2.5. Pryž.....	18
3.3. Diskretizace modelové soustavy.....	19
3.4. Modelování vybraných komponent konstrukční varianty A.....	22
3.4.1. Radiální pancéřování.....	22
3.4.2. Třidič, vrata.....	22
3.4.3. Přídavná hmotnost třidiče.....	25
3.4.4. Asfaltové podloží.....	26
3.4.5. Pojezdové kolo.....	26
3.4.6. Kotevní prvky.....	27
3.4.7. Usazení na betonovém podloží.....	29
3.4.8. Vlastní tíha technické soustavy.....	29
3.4.9. Přehled vybraných modelovaných komponent konstrukční varianty A.....	30
3.5. Teplotní analýza hrubé modelové soustavy.....	31
3.5.1. Posouzení vlivu radiálního pancéřování.....	31
3.5.2. Rozložení teplot hrubé modelové soustavy.....	33
3.6. Strukturální analýza hrubé modelové soustavy.....	35
3.6.1 Deformační analýza.....	35
3.6.2 Napěťová analýza.....	38
3.7. Detailní model.....	43
3.7.1 Teplotní analýza detailního modelové soustavy.....	44
3.7.2 Strukturální analýza detailního modelu.....	44

3.7.2.1	Deformační analýza	45
3.7.2.2	Napětíová analýza	48
4.	KONSTRUKČNÍ VAIANTA B	54
4.1.	Geometrický model	54
4.2.	Materiálový model.....	55
4.3.	Diskretizace modelové soustavy	55
4.4.	Modelování vybraných částí konstrukční varianty B	57
4.4.1.	Kluzné desky.....	57
4.4.2.	Přehled vybraných modelovaných komponent konstrukční varianty B	57
4.5.	Teplotní analýza hrubé modelové soustavy	59
4.5.1.	Rozložení teplot hrubé modelové soustavy	59
4.6.	Strukturální analýza hrubé modelové soustavy	60
4.6.1.	Deformační analýza	60
4.6.2.	Napětíová analýza	63
4.7.	Detailní model	67
4.7.1.	Teplotní analýza detailní modelové soustavy	68
4.7.2.	Strukturální analýza detailní modelové soustavy	68
4.7.2.1.	Deformační analýza	69
4.7.2.2.	Napětíová analýza.....	75
5.	SROVNÁNÍ KONSTRUKČNÍCH VARIANT.....	79
5.1.	Srovnání rozložení teplot.....	79
5.2.	Srovnání posuvů	81
5.3.	Srovnání průběhu redukovaného napětí	84
5.4.	Srovnání výskytu plastických zón	87
5.5.	Stručný přehled.....	88
6.	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ	89
6.1.	Nejasnosti zanesené do výpočtových modelů	91
6.2.	Návrhy pro budoucí analýzy	92
7.	LITERATURA	93
8.	PŘÍLOHY	94

1. POPIS TECHNICKÉ SOUSTAVY

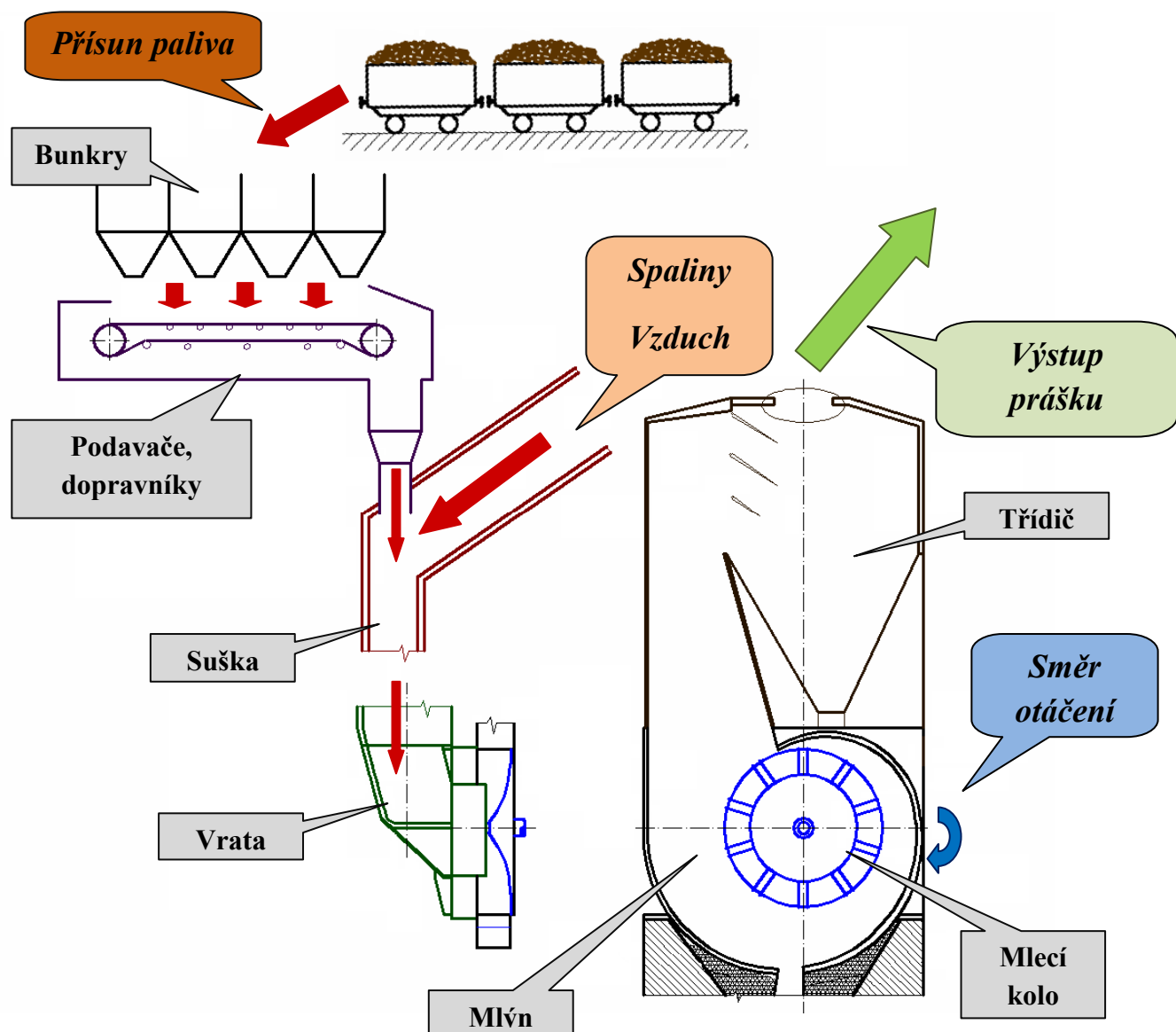
Předkládaná práce se bude zabývat prostory kotelní hnědouhelné elektrárny Prunéřov, konkrétně spirálovou skříní ventilátorového mlýna.

Činnost ventilátorového mlýna se skládá z mletí uhlí jeho odkazováním na stěny skříně pomocí mlecího kola, usazeného letmo v soudečkových ložiskách. Dále pak z vyfukování vzniklého prášku do třídiče, ze kterého putuje soustavou práškovodu až do kotle, kde hoří. Vzniklé teplo se využívá na výrobu páry a následně na roztočení turbíny a generátoru pro výrobu elektrické energie.

Palivo je k tepelné elektrárně dopravováno železniční dopravou, kde je uskladněno. Následně jsou jím naplněny bunkry, jež plní funkci zásobníků. Odtud je palivo dopravováno přes soustavu podavačů a dopravníků do sušky, kde je vysoušeno pomocí horkého vzduchu a spalin přiváděných z kotle. Zde surové palivo ztrácí podstatnou část z 35% vody, která je v něm obsažena.

Ze sušky se dostává palivo přes vrata umístěná v přední části mlýna až k lopatkám mlecího kola. Ty je odhazují na stěny skříně a tím melou na jemný prášek, který je opět mlecím kolem vyfukován přes otvor v horní části mlýna do třídiče, nacházejícího se nad mlýnicí. Funkce třídiče je regulovat pomocí soustavy klapek průtok prášku do práškovodů, jež ústí v kotli. Změnou úhlu klapky je možno zpomalit tok prášku, a tím zapříčinit, že těžší částice ztratí na své rychlosti a nedostanou se až k práškovodům, ale propadnou do dolní části třídiče, jež ústí u vrat mlýna a následně opakují cestu mlýnem. Tímto způsobem je možno regulovat hrubost prášku proudícího do kotle.

Každý kotel je zásobován uhelným práškem z osmi mlýnic, které se podle smyslu otáčení mlecího kola rozdělují na levé a pravé.



Obr.1 Schéma oběhu paliva

V provozním režimu tvoří mlýn spolu s dalšími komponenty ucelený celek, jimiž prochází palivo. Z hlediska požadovaných analýz jsou uvažovány veškeré komponenty, jež mohou při procesu úpravy paliva na sebe se skříní vzájemně silově působit, popř. mohou ovlivnit silové poměry skříně mlýna. Komponenty, které jsou volně zavěšeny, popř. jsou ustaveny samostatně, není nutno ve výpočtech uvažovat. Z těchto předpokladů vyplývá, že není možno vynechat vrata mlýna a třídič nacházející se nad mlýnem. Nepodstatným z hlediska napjatosti a deformací skříně mlýna se jeví mlecí kolo s hřídelem nacházejícím se v prostoru za mlýnem a dále také elektromotor s převodovkou.

Jednotlivé hlavní komponenty jsou vyobrazeny na fotografiích a obrázcích geometrického modelu níže. Jedná se o tyto základní části:

- Mlýn
- Třídič
- Vrata
- Asfaltové podloží

Dále je zde uvedeno názvosloví základních částí skříně mlýna, se znázorněním na geometrickém modelu (viz obrázky níže):

- Levá patka
- Pravá patka
- Lapač drobných a těžkých předmětů
- Vstupní otvor hřídele mlecího kola
- Vstupní otvor pro vstup paliva
- Radiální pancéřování
- Pancéřování přední a zadní stěny
- Panty
- Přítlačné šrouby
- Kotevní prvky
- Pryžové těsnění

Skříň mlýna je provedena jako svařenec, převážně z plechů tloušťky 20 mm. Určité části jsou vyrobeny z plechů tloušťky 10 mm, popř. z jiných polotovarů. Celá skříň leží na betonovém podloží, přičemž je pro větší stabilitu vybavena levou a pravou patkou, které jsou vyztuženy žebry. Jsou vytvořeny ze dvou horizontálních plechů, mezi nimiž je přivařen rám z profilu U200. Každá z patek je ukotvena kotevní tyčí, která je zajištěna maticí. Část mlýnice se nachází pod úrovní okolního terénu, kde je od okolní betonové základny oddělena vrstvou asfaltu. Přední a zadní stěna mlýnice jsou vyztuženy ocelovým pancéřováním tloušťky 20 mm. Spirálová část skříně je vyložena radiálním pancéřováním, skládajícím se z plechů tloušťky 20 mm a výšky 100 mm, které jsou volně vyskládány po obvodu spirálové stěny mlýnice. V její dolní části je umístěn lapač drobných a těžkých předmětů (šrouby, matice, kameny), které by se mohly dovnitř dostat spolu s uhlím.

Na přední části vrat jsou zavěšeny vrata, plnící funkci násypky paliva. Uchycena jsou ke skříně ve dvou pantech, které jsou také vyztuženy žebry. Mezi vraty a skříní je pryžové těsnění. Spodní část vrat je opatřena pojezdovým kolem, pootočeným tak, aby se při otevírání pohybovalo po kružnici se středem v ose pantů. Proti samovolnému otevření jsou vrata jištěna třemi přitlačnými šrouby. Jejich vnitřní část je vyplněna žárobetonem. Jeho hmotnost je vzhledem k ostatním částem celku značná a tudíž ji nelze zanedbat. Nad vraty se nachází přechodový kus, který je zavěšen na okolní ocelovou konstrukci a při otevření vrat zůstává zavěšen na svém místě. V zadní části skříně je otvor pro vstup hřídele mlecího kola, s labyrintovým těsněním zamezující úniku média z vnitřních prostor mlýnice.

Na horní část mlýna je položen a přišroubován třídič, který není s okolní konstrukcí nikterak spojen. Práškovody na něj navazující jsou zavěšeny na okolní ocelové konstrukci.

Hřídel mlecího kola je umístěn letmo. Prostor mezi skříní mlýna a hřídelem je vyplněn labyrintovým těsněním.

Mlecí soustava pracuje za vysokých teplot, dosahujících až 300°C ve vratech mlýna a směrem k třídiči se snižují. Maximální dovolená teplota v ústí třídiče je 215°C.



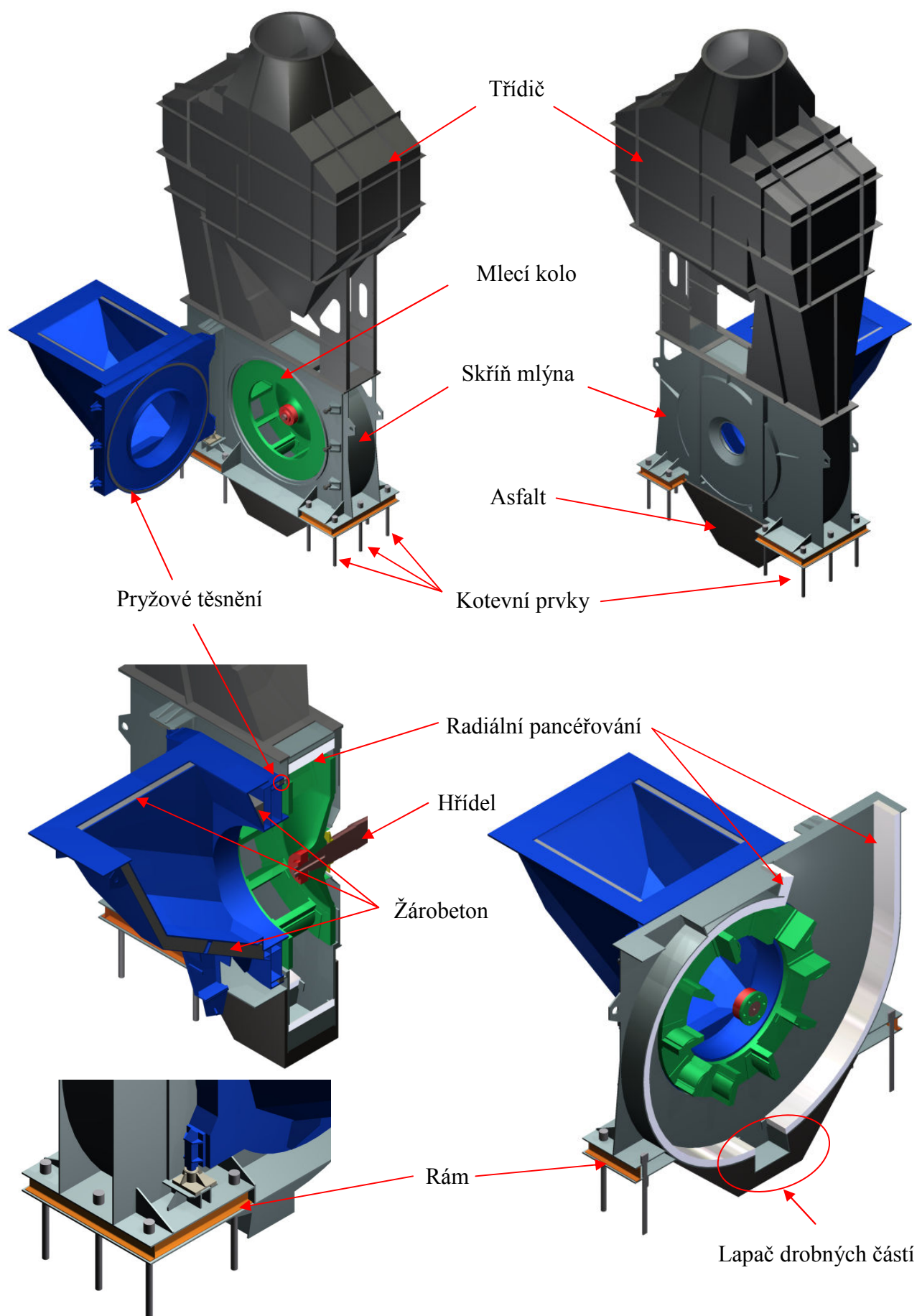
Obr.2 Zadní pohled na mlýnici, třídič a vrata (v otevřené poloze)

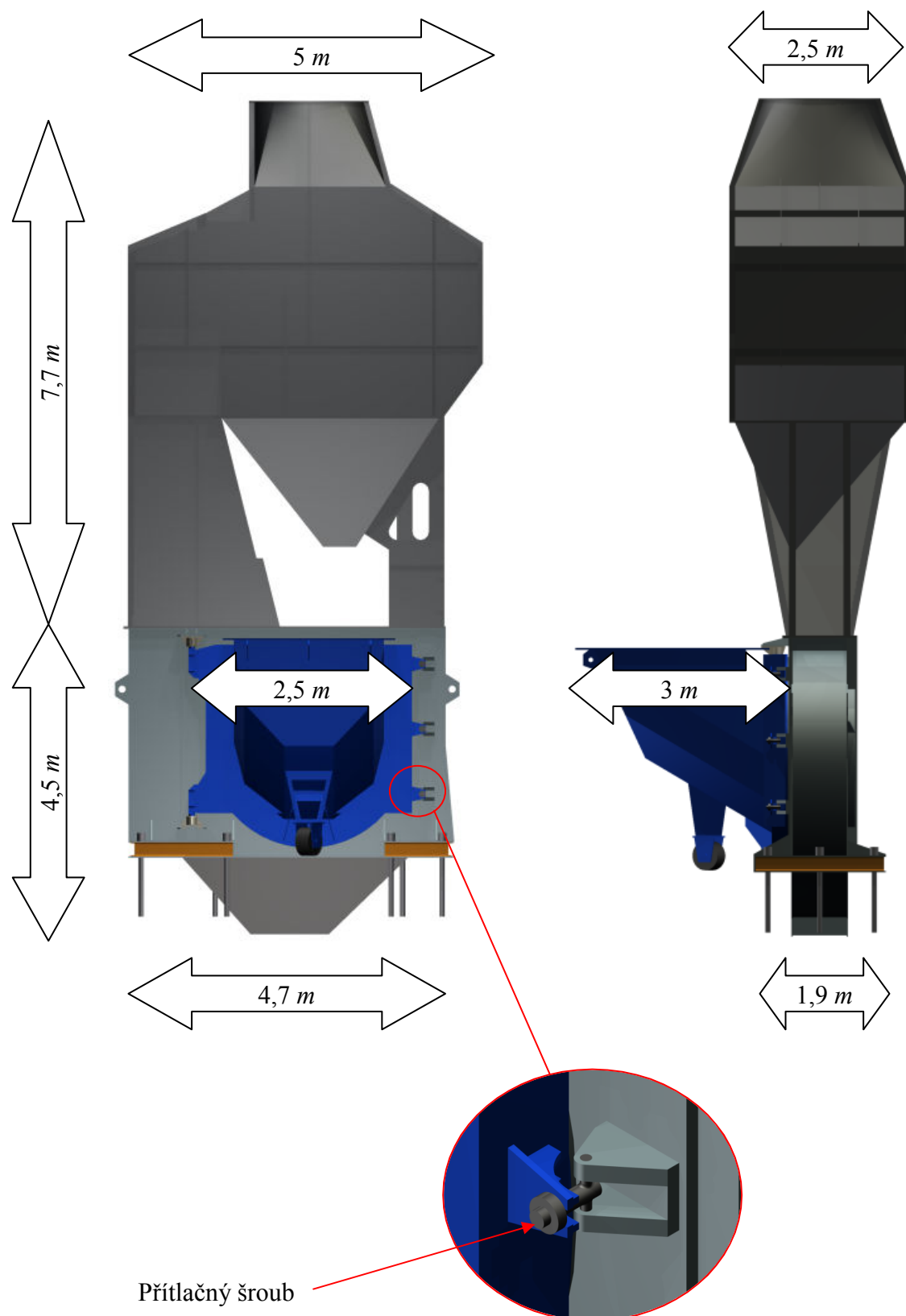


Obr.3 Vstup hřídele mlecího kola s převodovkou a elektromotorem



Obr.4 Čelní pohled na mlýnici, třídič, vrata a přechodový kus





Obr.5 Schéma technické soustavy

2. FORMULACE TECHNICKÉHO PROBLÉMU

Důvodem pro provedení této práce byl požadavek zjistit napětové a deformační stavy na spirálové skříně ventilátorového mlýna, při zvýšení výkonu dané tepelné elektrárny, spojené se zvýšením výkonu kotle. Tato úprava klade požadavky na zvýšení výkonu mlýnů, které jsou nuceny zpracovat větší množství paliva, a tím se mění silové poměry na této mlýnici. Veškeré analýzy budou provedeny v plném pracovním režimu daných zařízení. Nebudou uvažovány mezní situace jako havárie, výbuch paliva, atd.

Pro zvýšení výkonu mlýnic přicházejí v úvahu dvě varianty, jež se liší ve využití stávajících částí mlecí soustavy a jejich nahrazení zcela novými komponentami:

Varianta	Mlýnice	Vrata	Mlecí kolo	Třidič
A	Původní	Nové provedení	Nové provedení	Původní
B	Nové provedení	Nové provedení	Nové provedení	Původní

2.1. Konstrukční varianta A

V tomto provedení se předpokládá zachování většiny hlavních komponent mlecí soustavy. Nahrazena jsou vrata, která jsou úplně nová. Nově je provedeno také mlecí kolo, u něž se počet lopatek zvýšil z 10 na 12. Rozměry skříně mlýna a třidiče jsou zachovány.

2.2. Konstrukční varianta B

Nově navrhované konstrukční provedení předpokládá využití nových vrat a úpravu mlecího kola shodně s variantou A. Inovované jsou rozměry skříně a její vyztužení. S tím jsou spojeny i nepatrné změny rozměrů hřídele a umístění převodovky s elektromotorem. Konstrukční provedení třidiče je původní.

Základním požadavkem na prováděnou práci je:

1. Sestavení výpočtových modelů
2. Provedení výpočetních simulací
3. Vyhodnocení výsledků a porovnání obou konstrukčních variant

2.3. Rozbor technické soustavy a postup řešení

Analýzy byly provedeny s uvážením pružně-plastického chování materiálu skříně, za předpokladu plného pracovního režimu daných zařízení. Nebyly uvažovány mezní situace, jako jsou havárie, výbuch paliva, atd. Vibrace vzniklé rotací mlecího kola a otřesy způsobené nárazy paliva na stěny mlýna nejsou do výpočtových modelů zahrnuty.

Před samotným provedením požadovaných analýz bylo nutné seznámit se s procesem mletí. Následně byly určeny části, na které je nutno pohlížet detailněji a vymezit jejich specifické vlastností, které budou následně zavedeny do výpočtových modelů.

Při řešení dané úlohy bylo užito počítačového modelování s využitím numerických metod, konkrétně metoda konečných prvků (dále jen MKP).

Bylo také využito principu submodelingu, kdy byl vytvořen hrubý model, obsahující i části, jež nejsou předmětem této analýzy, ale jejich zahrnutí do výpočtového modelu bylo považováno za nutné. Jedná se o výše zmíněné vrata s žárobetem a těsněním a třídič. Radiální pancéřování bylo z modelové soustavy vynecháno a jeho přítomnost byla akceptována v podobě tíhové síly odpovídající hmotnosti tohoto pancéřování. Tato síla byla zavedena do hrubého modelu, ze kterého byla vybrána část odpovídající předmětu zájmu této práce, na níž byly dané analýzy provedeny s větším důrazem na přesnost a na jejich základě byly vysloveny závěry.

K provedení MKP analýzy byl užit výpočtový program ANSYS Release 12 Workbench, do jehož pracovního prostředí byl importován geometrický model vytvořený v CAD systému Autodesk Inventor Professional 2009.

Charakter daných těles nabídl možnost využít skřepinových prvků, které byly v určitých detailních částech doplněny objemovými prvky. V obou případech se jednalo o izoparametrické prvky (detailnější popis je uveden v kapitole 3.3. Diskretizace modelové soustavy). Daná analýza byla provedena na dvou konstrukčních variantách spirálové skříně ventilátorového mlýna.

Obojí analyzované konstrukční varianty, byly pro mlýny pravé. Výsledná řešení získaná pro tento typ mlýnů lze aplikovat i na mlýny levé, jež jsou shodné, pouze zrcadlově převrácené.

3. KONSTRUKČNÍ VARIANTA A

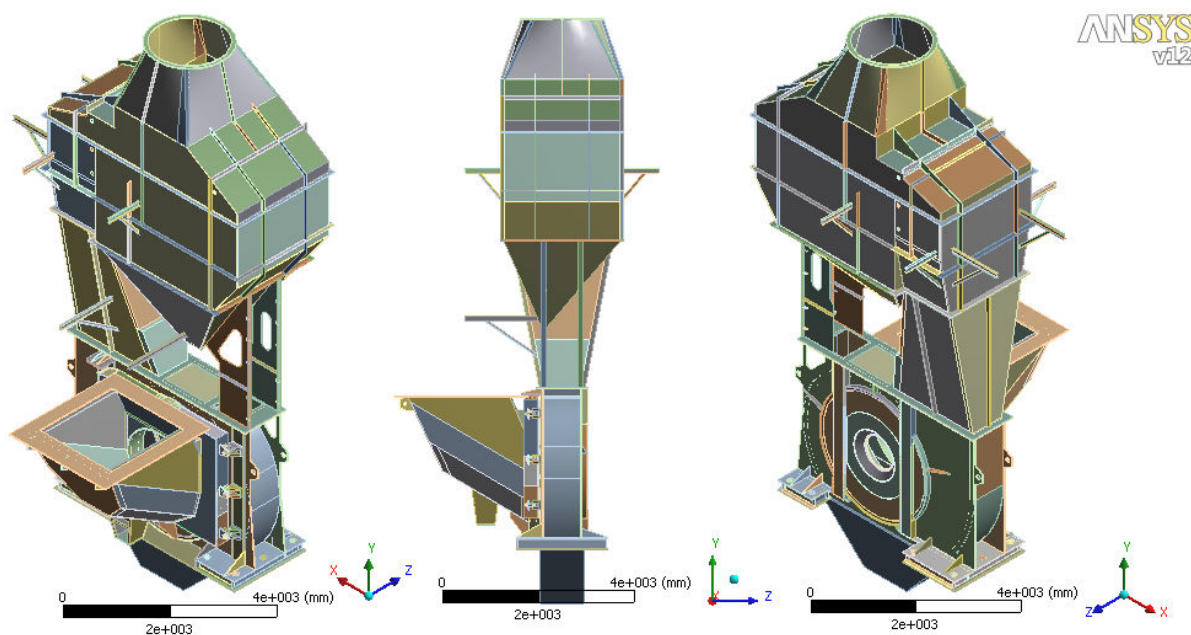
3.1. Geometrický model

Tvorba geometrického modelu probíhala dle poskytnuté technické dokumentace, ale zároveň bylo provedeno několik zjednodušení.

Základním zjednodušením celého modelu bylo považování skříně, vrat a třídiče za celistvá tělesa, tzn. nebyly uvažovány svarové housenky spojující dílčí plechy. Na čelní a týlní straně se vyskytují servisní a kontrolní otvory, které byly při tvorbě geometrického modelu zanedbány. Na vnějším povrchu a ve vnitřních prostorách třídiče byly vymodelovány nosníky, na které bude zadáno zatížení zohledňující klapky a servisní plošiny a žebříky. Z důvodu tvorby kvalitnější diskretizace, byl celý model následně rozčleněn na dílčí objemy. Na vratech bylo vynecháno pojezdové kolo a jeho rám, ty budou nahrazeny v numerickém modelu vhodnou okrajovou podmínkou.

Pro snadnější popis prostoru mlýna a jeho uložení byl zaveden kartézský souřadný systém x, y, z a to následujícím způsobem:

- z – shodná s osou rotoru
- x – horizontální směr
- y – vertikální směr
- Počátek je umístěn v polovině šířky mlecího kola



Obr.6 Geometrický model konstrukční varianty A



Obr.7 Pojezdové kolo vrat

3.2. Materiálový model

V celé analyzované soustavě je možno identifikovat vícero rozdílných materiálů. Převážnou část tvoří oceli, dále pak žárobeton, asphalt a pryž. Vzhledem k tomu, že ve vyšetřované skříně mlýna se vyskytuje pouze ocel a zbývající materiály se vyskytují pouze u těles, které ve výpočtovém modelu slouží jako okrajová podmínka, byly vlastnosti těchto materiálů považovány za lineární a pouze ocel jako pružně-plastický materiál. Chyba vzniklá tímto zjednodušením je nepatrná. V případě žárobetonu je nejpodstatnější vlastností hustota, aby byla postihnuta jeho celková hmotnost. Značnou nelinearitu pryžového těsnění je také možno zanedbat, protože se nevyšetřují její deformace ani napjatost.

V následujícím textu nejsou záměrně uvedeny konkrétní typy ocelí, ale pouze jejich popis s výpisem fyzikálních vlastností, které se k této oceli nejvíce hodí. Tento postup je zvolen ze dvou důvodů:

1. V dnešní době již není možné dohledat, z jakých materiálů je vyrobeno stávající zařízení (skříň, pancéřování, třidič, vrata)
2. V termínu dokončení této práce, není ještě známo, z jakých materiálů bude vyrobeno nově konstruované zařízení (skříň, pancéřování, vrata)

Velmi vysoké provozní teploty (dosahující až 300°C ve vratech mlýna) si žádají zadání materiálových parametrů v závislosti na teplotě. Jedná se především o Youngův modul pružnosti E , koeficient teplotní délkové roztažnosti α a měrná tepelná vodivost λ .

3.2.1. Konstrukční ocel

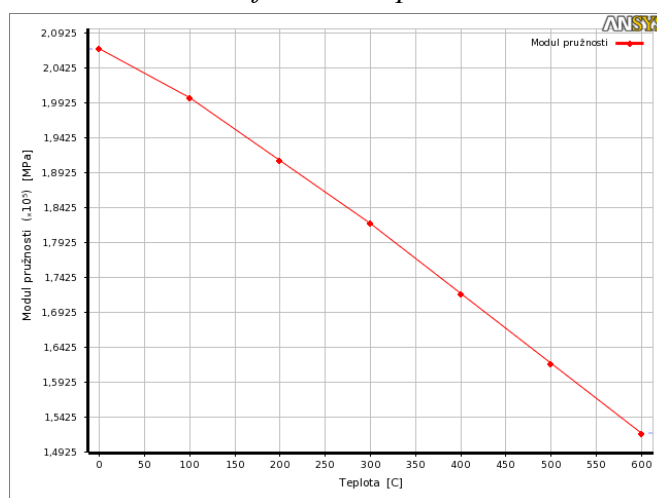
Nejvíce zastoupeným materiálem je konstrukční uhlíková ocel, vhodná pro svařování, s možností užití za zvýšených teplot. Z tohoto materiálu je vyrobená skříň mlýna, třidič a vrata, včetně veškerých periférií (kotevní prvky, přitlačné šrouby, panty, ...).

V patkách skříně mlýna se předpokládá výskyt oblastí s plastickými deformacemi, to je v materiálovém modelu zohledněno bilineárním izotropním modelem zpevnění. Vzhledem k tomu, že není možno zadat tento model do výpočtového software v závislosti na teplotě, je hodnota meze kluzu R_e a tečného modulu pružnosti E_T volena s ohledem na tyto teploty. Fyzikální vlastnosti jsou čerpány z [3], [6], [7], [8], [9], a [10].

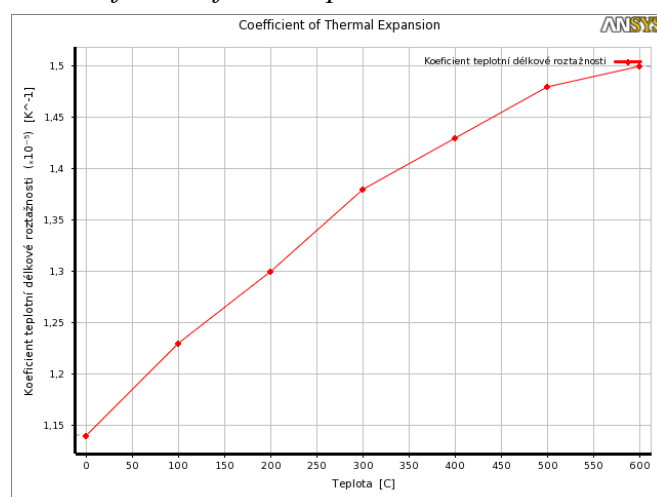
Tab.1. Fyzikální vlastnosti konstrukční oceli, dle [3], [6], [7], [8], [9], a [10]

$\rho = 7\,850\text{ [kgm}^{-3}\text{]}$		$Re = 200\text{ [MPa]}$	
$\mu = 0,3\text{ [-]}$		$E_T = 2\,500\text{ [MPa]}$	
$T\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$E\text{ [MPa]}$	$\lambda\text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$	$\alpha \cdot 10^6\text{ [K}^{-1}\text{]}$
0	207 000	51,9	11,4
100	200 000	51	12,3
200	191 000	48,5	13
300	182 000	44,4	13,8
400	172 000	42,7	14,3
500	162 000	39,3	14,8
600	152 000	35,6	15

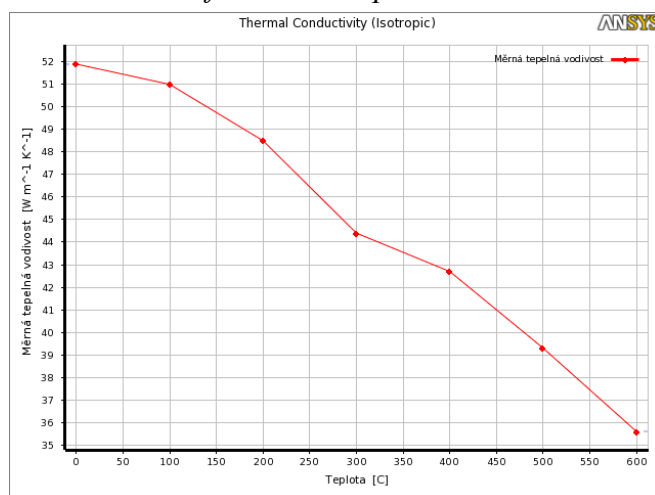
Graf 1. Modul pružnosti



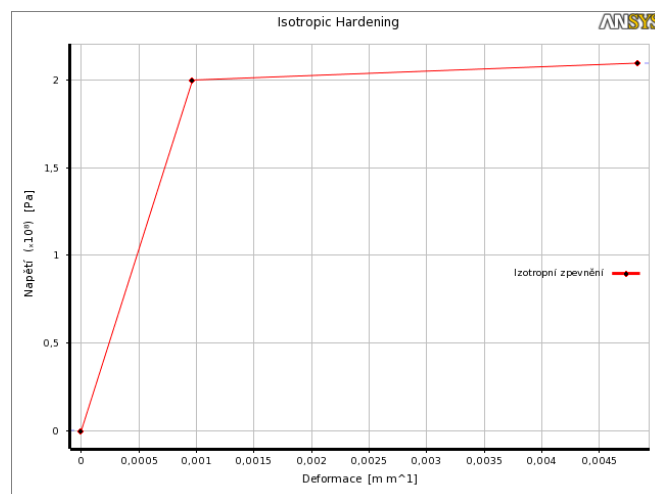
Graf 2. Koeficient teplotní délkové roztažnosti



Graf 3. Měrná tepelná vodivost



Graf 4. Bilineární izotropní model



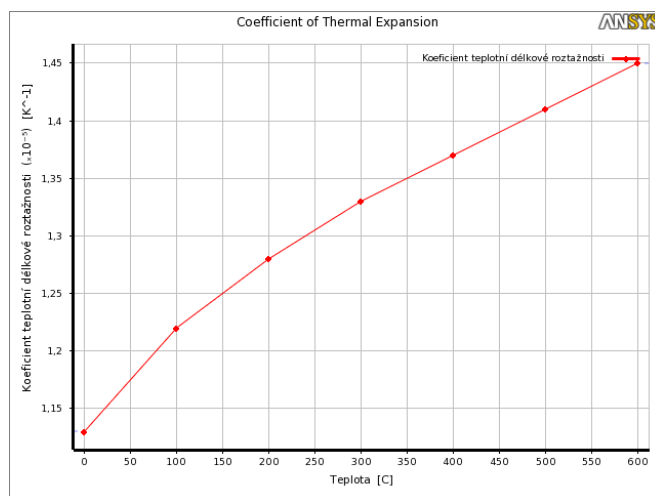
3.2.2. Ušlechtilá ocel

Radiální pancéřování a pancéřování na čelní a týlní straně skříně mlýna je vyrobené z ušlechtilé, žárovevné oceli s výraznějším podílem manganu. Dobře odolává rázům a nepodléhá snadno degradačním procesům. Na pancéřování se nepředpokládají plastické deformace, proto je materiál uvažován jako lineární, kde závislost modulu pružnosti je shodná s předešlou ocelí a graficky ji objasňuje *Graf 1. Modul pružnosti*. Fyzikální vlastnosti jsou čerpány z [3], [6], [7], [8], [9], a [10].

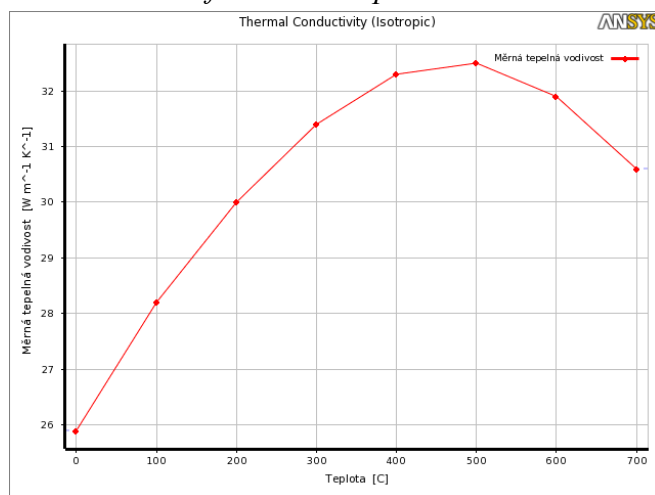
Tab.2. Fyzikální vlastnosti ušlechtilé oceli, dle [3], [6], [7], [8], [9], a [10].

$\rho = 7\,850\text{ [kgm}^{-3}\text{]}$			
$\mu = 0,3\text{ [-]}$			
$T\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$E\text{ [MPa]}$	$\lambda\text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$	$\alpha \cdot 10^6\text{ [K}^{-1}\text{]}$
0	207 000	25,9	11,3
100	200 000	28,2	12,3
200	191 000	30	12,8
300	182 000	31,4	13,3
400	172 000	32,3	13,7
500	162 000	32,5	14,1
600	152 000	31,9	14,5
700	-	30,6	-

Graf 5. Koeficient teplotní délkové roztažnosti



Graf 6. Měrná tepelná vodivost



3.2.3. Žárobeton

Z vlastností žárobetonu je nejpodstatnější hustota, aby byla postižena celková hmotnost. Dále pak měrná tepelná vodivost, která ovlivní teploty na vnějších partiích vrat. Tento materiál byl považován za zcela lineární. Měrná tepelná vodivost je dána vztahem:

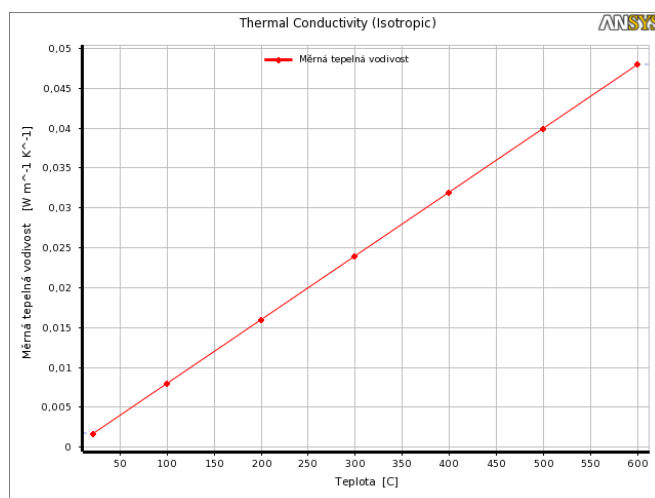
$$\lambda = 0,8 - 0,9 \cdot 10^{-4} \cdot T$$

Fyzikální vlastnosti jsou čerpány z [6], [7] a [9], popis závislosti měrné tepelné vodivosti na teplotě čerpán z [7].

Tab.3. Fyzikální vlastnosti žárobetonu, dle [6], [7] a [9]

$\rho = 2\,100 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$	
$\mu = 0,18 \text{ [-]}$	
$E_B = 30\,000 \text{ [MPa]}$	
$\alpha \cdot 10^6 = 14 \text{ [K}^{-1}\text{]}$	
$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\lambda \text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$
22	0,00176
100	0,008
200	0,016
300	0,024
400	0,032
500	0,04
600	0,048

Graf 7. Měrná tepelná vodivost



3.2.4. Asfalt

Materiálové vlastnosti asfaltového podloží byly značně zjednodušeny. Byla pomínuta jeho fyzikální podstata, kdy se chová jako tuhé těleso a při překročení smykových sil jako kapalina. Patří tedy do skupiny materiálů zvané Binghamovské kapaliny. Efekt přechodu z pevné do kapalné fáze je také závislý na teplotě, která je v prostoru mezi mlýnicí a betonovým podložím, vysoká. Betonové podloží je zde možno uvažovat jako dokonalý izolant. V tuhém stavu se asfalt chová výrazně nelineárně a v modelových soustavách bude plnit pouze funkci tepelného izolantu. Jeho vliv na napjatost a deformace skříně mlýna lze zanedbat. Na základě výše zmíněných důvodů je asfalt považován za zcela lineární materiál, kdy mu je úmyslně přiřazena extrémně nízká tuhost v podobě modulu pružnosti E_A , a také nízký koeficient teplotní délkové roztažnosti α . Fyzikální vlastnosti jsou čerpány z [6], [7], a [9].

Tabulka fyzikálních vlastností asfaltu – viz 3.2.5. Pryž

3.2.5. Pryž

Materiálové vlastnosti pryžového těsnění jsou zjednodušeny z obdobných důvodů jako u asfaltu. Fyzikální vlastnosti jsou čerpány z [6], [7], a [9].

Tab.4. Fyzikální vlastnosti pryže a asfaltu, dle [6], [7], a [9]

Pryž	Asfalt
$\rho = 1\,200 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$	$\rho = 2\,100 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$
$\mu = 0,45 \text{ [-]}$	$\mu = 0,2 \text{ [-]}$
$E_p = 1 \text{ [MPa]}$	$E_A = 1 \text{ [MPa]}$
$\alpha \cdot 10^6 = 0,1 \text{ [K}^{-1}\text{]}$	$\alpha \cdot 10^6 = 0,1 \text{ [K}^{-1}\text{]}$
$\lambda = 50 \text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$	$\lambda = 0,8 \text{ [Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$

3.3. Diskretizace modelové soustavy

Pro diskretizaci geometrického modelu bylo užito několik typů konečných prvků v závislosti na prováděné analýze. Prvotní diskretizování bylo určeno pro strukturální analýzu, v níž jsou vyšetřovány napjatost a deformace. S výhodou se zde uplatnily skořepinové prvky doplněné o prvky objemové. Každý z užitých prvků má tři stupně volnosti v každém ze svých uzlů – posuvy ve směrech x , y , z .

Využité prvky:

- 12-ti uzlový kombinovaný solid – shell (SOLSH190) (kombinace skořepinového a prostorového prvku)
 - Tento typ prvku kombinuje výhody skořepinového prvku s prvkem objemovým, kdy odpadá nutnost definování tloušťky daného tělesa v podobě konstanty zadané do MKP software, ale tato tloušťka se vypočte automaticky
 - Využit na veškeré dílce odpovídající charakteristice skořepin (dva rozměry značně převyšují rozměr třetí – tloušťku)
- 20–ti uzlový hexaedrický (SOLID186)
 - Využit na většinu částí, které se nedají popsat skořepinovými prvky
- 8–mi uzlový tetraedrický (SOLID187)
 - Využit na okrajové části, které se nedají popsat skořepinovými ani hexaedrickými prvky (zaoblené plochy, tvarově komplikované plochy)

Veškeré zmíněné prvky umožňují řešit mnoho rozličných úloh. Nebudou využity všechny jejich vlastnosti.

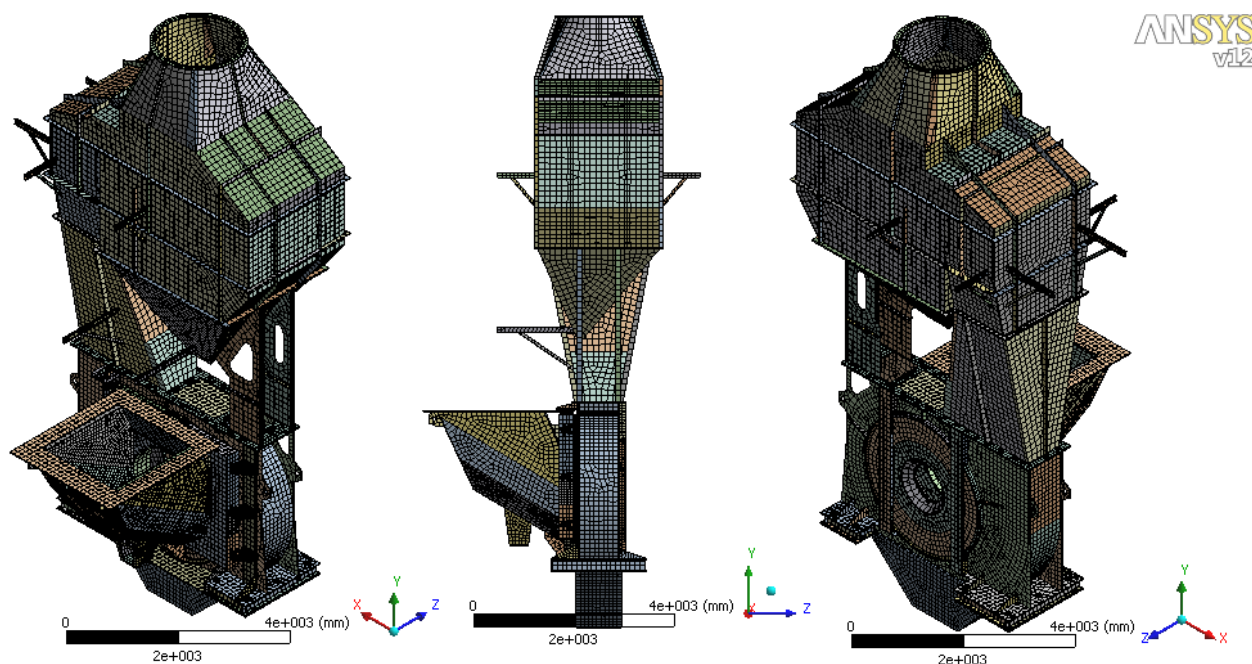
Konečné prvky užívané pro strukturální analýzu nejsou uzpůsobeny pro termální analýzu, která předchází analýze strukturální, proto došlo k jejich nahrazení. Strukturální prvky byly automaticky nahrazeny odpovídajícími objemovými prvky třech základních skupin, jejichž stupněm volnosti je teplota:

- 20–ti uzlový hexaedrický (SOLID90)
 - Nahrazuje SOLID186
- 8–mi uzlový hexaedrický (SOLID70)
 - Nahrazuje SOLSH190
- 10–ti uzlový tetraedrický (SOLID87)
 - Nahrazuje SOLID187

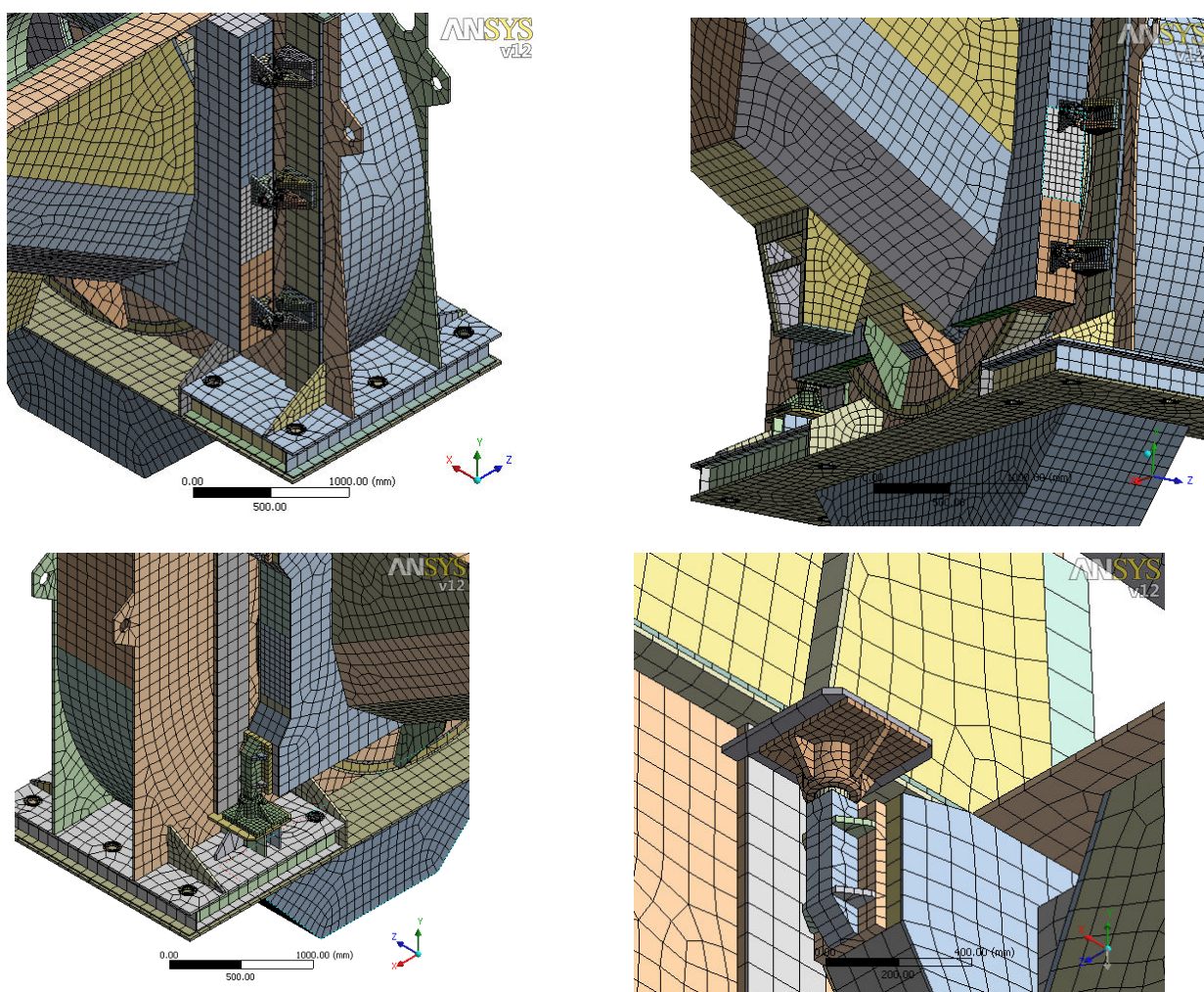
Kontaktní prvky se nacházejí v místech spojení (dotyku) základních komponentů. Pro všechny kontakty jsou využity dva stejné typy prvků, přičemž chování uzlů jednotlivých prvků je upřesněno až v nastavení těchto kontaktů (zdali může dojít k oddělení kontaktních ploch, popř. k jejich vzájemnému posunutí). Na každou z kontaktních ploch jsou umístěny oba typy těchto prvků, čím se zvyšuje numerická stabilita výpočtu:

- 8–mi uzlový plošný, kontakt plocha – plocha (CONTA174)
- 8–mi uzlový plošný, kontakt plocha – plocha (TARGE170)

Celkový počet prvků byl přibližně 76 000 a jim odpovídající počet uzlů se blížil 251 000.



Obr.8 Diskretizovaný model konstrukční varianty A



Obr.9 Detailní pohledy na přítlačné šrouby, rám pojezdového kola, dolní a horní pant.

3.4. Modelování vybraných komponent konstrukční varianty A

V této kapitole je popsáno, jakým způsobem byly modelovány určité, specifické komponenty technické soustavy, významné z hlediska napjatosti a deformace, popř. jejího uložení v prostoru kotelny. Dané komponenty byly do výpočtových modelů zahrnuty v podobě okrajových podmínek, kdy byly příslušným uzlům předepisovány posuvy (převážně nulové, v případě submodelingu nenulové) a uzlové síly (zohledňující tíhu komponent).

3.4.1. Radiální pancéřování

Značnou hmotnost plechů, tvořící radiální pancéřování, je nutno zohlednit v prováděných analýzách. Jejich konstrukční provedení dovoluje dilataci ve směru z , aniž by došlo ke kontaktu se skříní mlýna. Z tohoto důvodu je možno považovat jejich silový účinek na skřín mlýna za minimální a zahrnout je do výpočtového modelu pouze jako tíhovou sílu úměrnou hmotnosti tohoto pancéřování. Tíhová síla je dopočtena dle níže uvedeného vztahu a zaokrouhlena. Hmotnost je určena pomocí software ANSYS $m_{RP} = 7\,430\text{ [kg]}$.

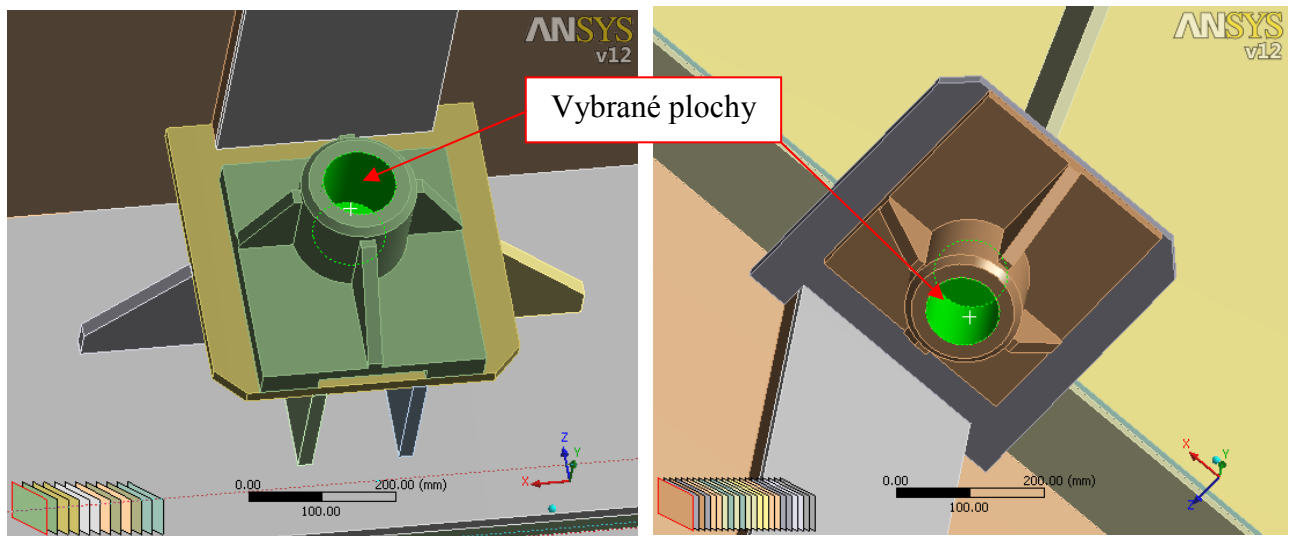
$$F_{RP} = m_{RP} \cdot g = 7\,430 \cdot 9,81$$

$$F_{RP} = 72\,890\text{ N}$$

3.4.2. Třídič, vrata

Již v počátku vypracovávání práce bylo rozhodnuto o využití metody submodelingu, kde vrata a třídič jsou do modelové soustavy zahrnuty, aby bylo možno určit jejich silové působení na skřín mlýna. Jejich přítomnost bude do detailního modelu zahrnuta v podobě uzlových posuvů vybraných ploch. Jedná se o tyto plochy:

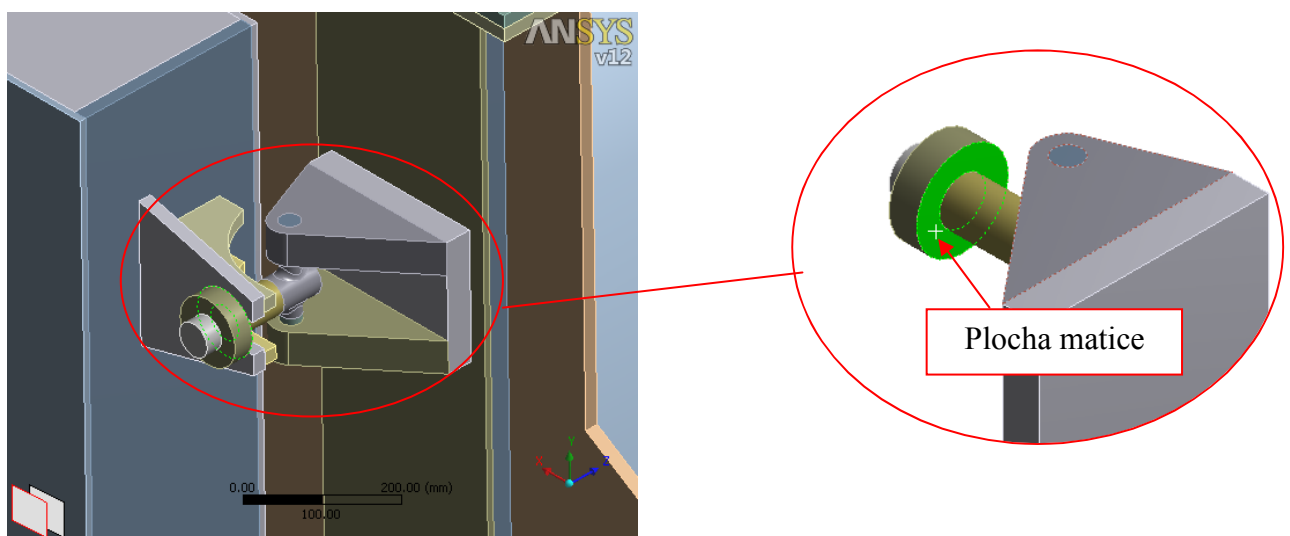
1. Válcové a dosedací plochy pantů
 - V tomto případě se počítá s velmi vysokou přesností výroby a montáže
 - Tento předpoklad umožňuje spojit plochy pomocí kontaktu simulujícího pevné spojení, které nedovoluje proklouznutí ani vzájemné oddělení ploch (kontakt BONDED)



Obr.10 Vybrané plochy dolního a horního pantu

2. Plochy matic přitlačných šroubů

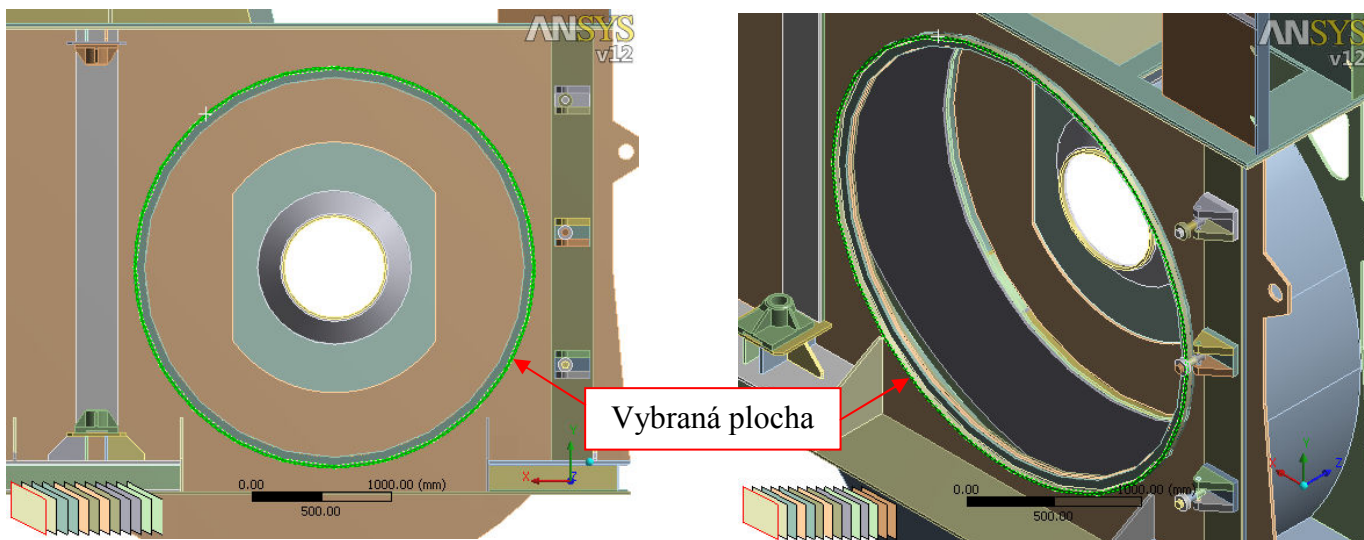
- Předpokládá se předpětí přitlačných šroubů, jež se v průběhu činnosti mletí výrazně nemění
- Plochy jsou spojené pomocí kontaktu simulujícího pevné spojení, které nedovoluje proklouznutí ani vzájemné oddělení ploch (kontakt BONDED)



Obr.11 Plocha matice přitlačného šroubu

3. Dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní

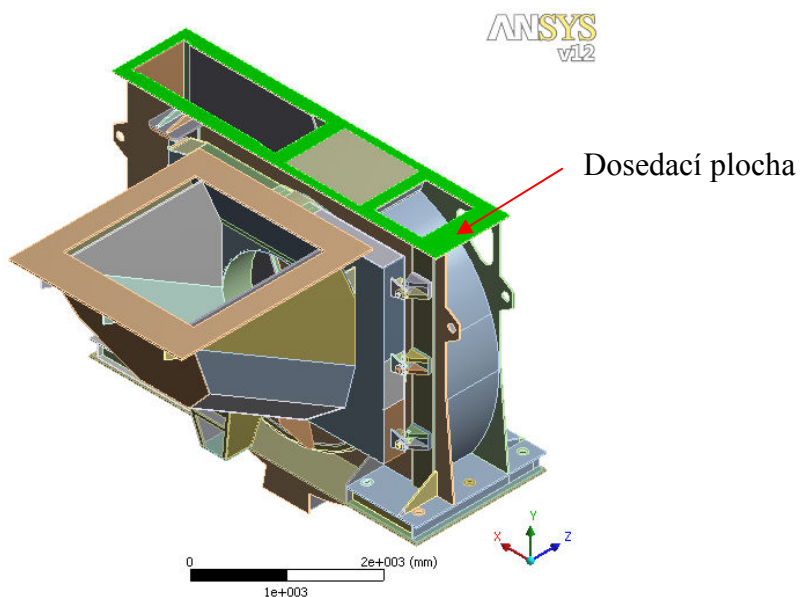
- Plochy jsou spojeny kontaktem, který umožňuje vzájemné proklouznutí, popř. oddělení kontaktních ploch (kontakt FRICTIONLESS)
- Třecí síly se neuvažují, koeficient tření je nulový



Obr.12 Plocha skříně dosedající na pryžové těsnění

4. Horní plocha skříně mlýna, na níž leží třídič

- Plochy jsou spojené pomocí kontaktu simulujícího pevné spojení, které nedovoluje proklouznutí ani vzájemné oddělení ploch (kontakt BONDED)



Obr.13 Horní plocha skříně mlýna

3.4.3. Přídavná hmotnost třídiče

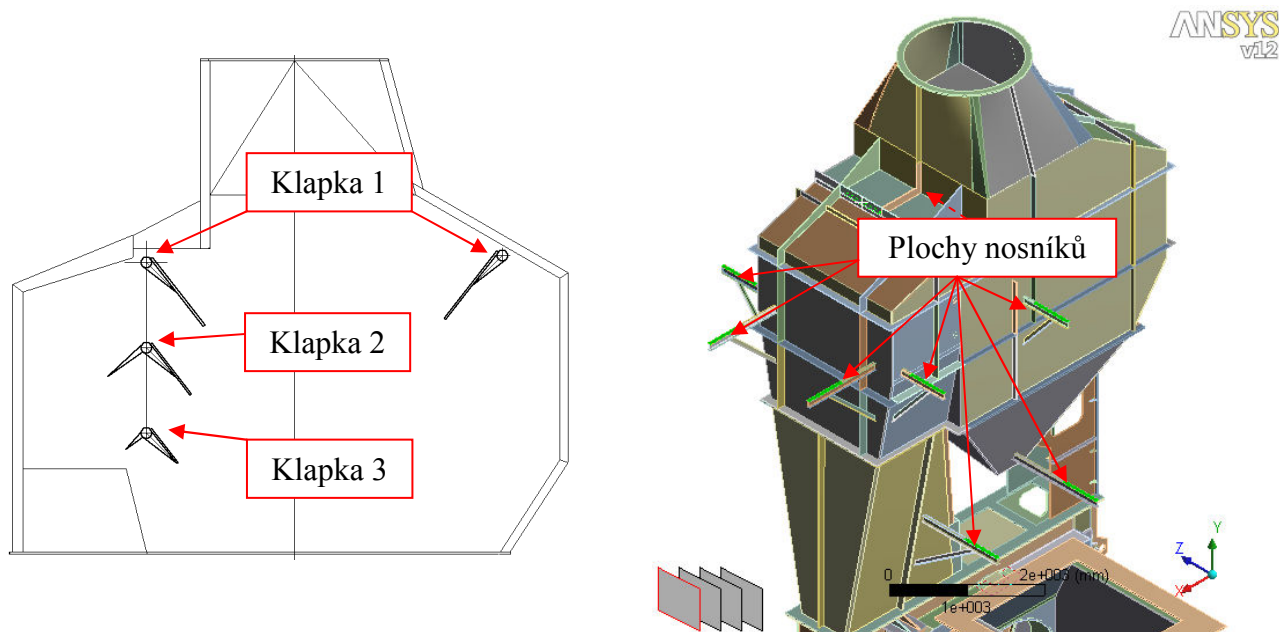
Kromě regulačních klapek nacházejících se uvnitř třídiče jsou k němu zvenčí ukotveny servisní plošiny a žebříky. Jejich hmotnost není vzhledem k hmotnosti celku nijak významná, přesto bude do výpočtu zahrnuta v podobě tíhové síly zadané na odpovídající plochy nosníků třídiče. Celková přídavná hmotnost plošin a žebříků je ve spolupráci s Ivitas a.s. stanovena na 1300 kg v horním patře a 320 kg v dolním patře. Hmotnosti klapek jsou 2 x 450 kg (klapka 1), 400 kg (klapka 2) a 350 kg (klapka 3), do celkové hmotnosti klapek není zahrnuta nosná hřídel. Tíhová síla plošin, žebříků a klapek je dopočtena ze vztahu:

$$F_i = \text{hmotnost}_i * g$$

$$g = 9,81 [ms^{-2}]$$

Tab.5. Tíhové síly plošin, žebříků a klapek

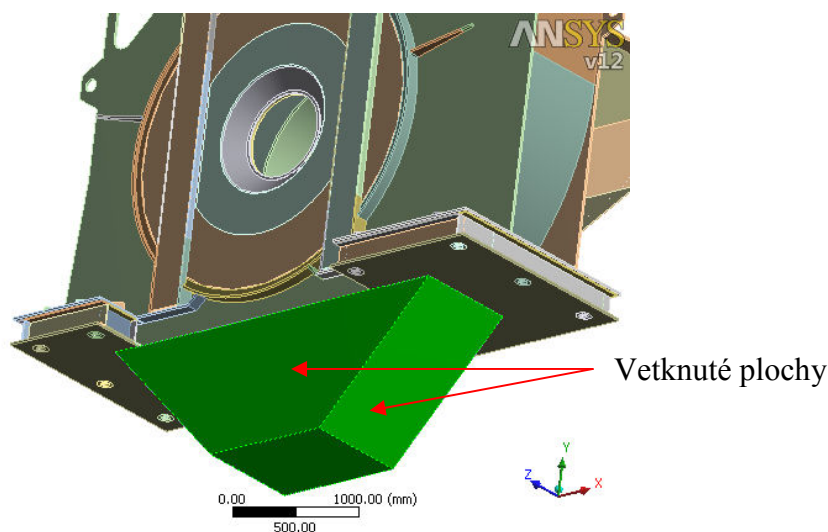
Element	Hmotnost [kg]	Síla [N]	Označení
Plošiny – horní patro	1300	12 750	F_{PH}
Plošiny – dolní patro	320	3 140	F_{PD}
Klapka 1	450	4 415	F_1
Klapka 2	400	3 924	F_2
Klapka 3	350	3 435	F_3



Obr.14 Rozmístění klapek a ploch nosníků pro zadání přídavné hmotnosti

3.4.4. Asfaltové podloží

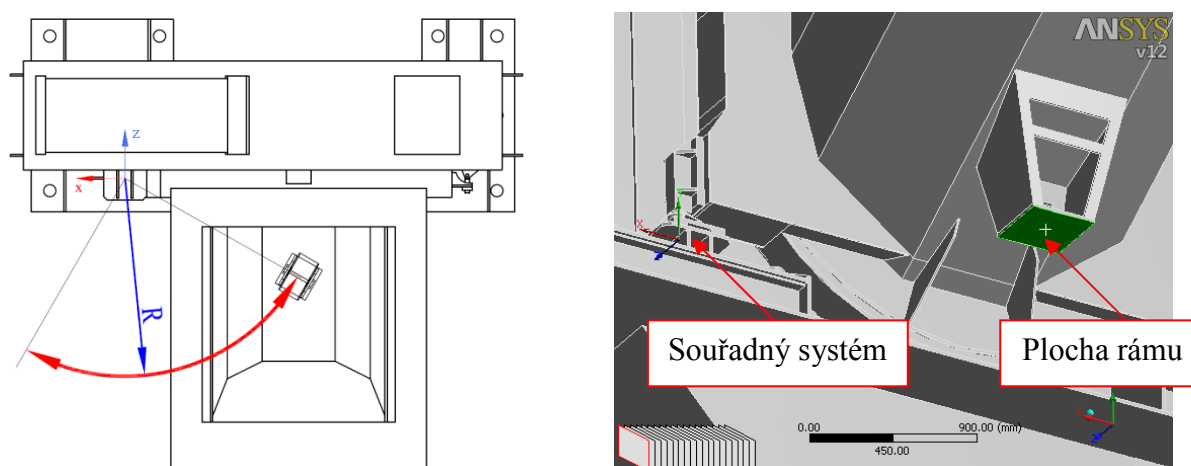
Předpokladem je těsné přilnutí asfaltu k povrchu skříně a k okolnímu betonovému podloží. V rámci tohoto předpokladu je možno asfalt modelovat jako samostatné těleso spojené se skříní kontaktem simulující pevné spojení, které nedovoluje proklouznutí ani vzájemné oddělení ploch (kontakt BONDED). Uzlům náležícím vnějším plochám tělesa simulujícího asfaltové podloží jsou odebrány veškeré stupně volnosti.



Obr.15 Asfaltové podloží

3.4.5. Pojezdové kolo

Při tvorbě modelové soustavy bylo vynecháno pojezdové kolo vrat. Jeho přítomnost ve výpočtu je zohledněna zamezením určitých posuvů rámu, na němž je pojezdové kolo uchyceno. Posuvy jsou zadávány v kartézském souřadném systému, který byl zaveden v dolním pantu skříně. Jeho osy mají stejný směr, jako hlavní osy geometrického modelu, osa z je osou pantů. Umožněny jsou posuvy ve směrech x a y a natočení kolem osy z. Tato okrajová podmínka vychází z předpokladu, že se vrata mohou posunout po pojezdovém kole, které není brzděno (natočení kolem osy z) a to se může nepatrně posouvat po ocelové podložce (posuvy ve směrech x a y).



Obr.16 Volba souřadného systému v dolním pantu skříně mlýna

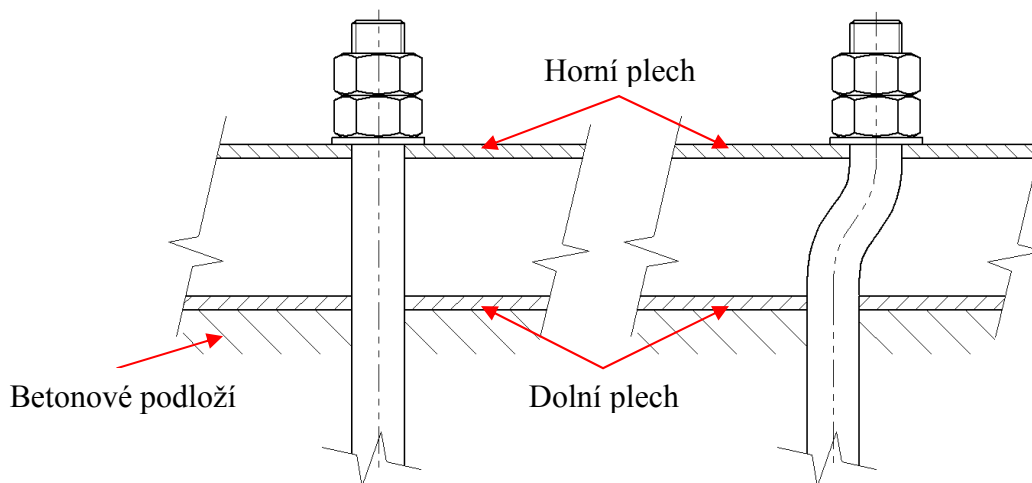
3.4.6. Kotevní prvky

Proti posuvu skříně z vymezených prostor je jištěna sadou kotevních prvků, skládajících se z tyče, matice a podložky. V geometrickém modelu byly vytvořeny mezikruží vyřezané do plechu příslušející kotevním prvkům. Poté byly mezikruží diskretizovány objemovými prvky, to umožní podrobnější analýzu rozložení napětí po tloušťce plechu v místě dotyku s kotevním prvkem.

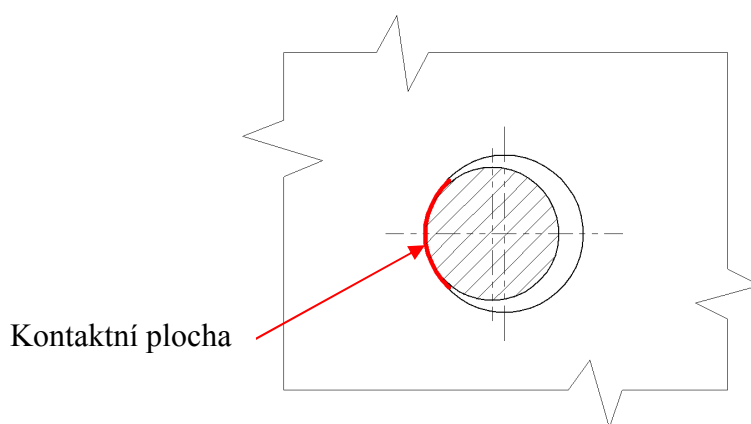
Obě patky jsou vyztuženy značným počtem válcovaných profilů, a tudíž se nepředpokládá vzájemné posunutí horního plechu patky, vůči dolnímu plechu. Uvažuje se sousost horního mezikruží, dolního mezikruží a kotevního prvku i při plném zatížení.

Z těchto předpokladů byla vyvozena okrajová podmínka simulující spojení čepu a náboje. Jestliže nastane vlivem deformací kontakt kotevní tyče (čep) a mezikruží (náboj), dojde k zamezení posuvu v normálovém směru všem uzlům spadajícím do kontaktní válcové plochy.

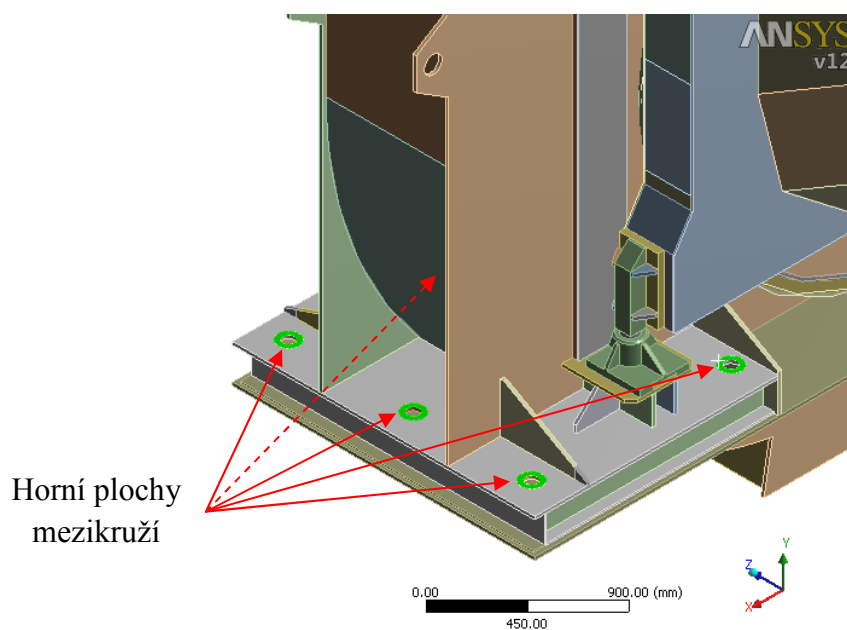
Všem uzlům náležícím horní ploše mezikruží (plocha pod podložkou), byl zamezen posuv ve směru y (vertikální směr).



Obr.17 Deformace kotevního prvku



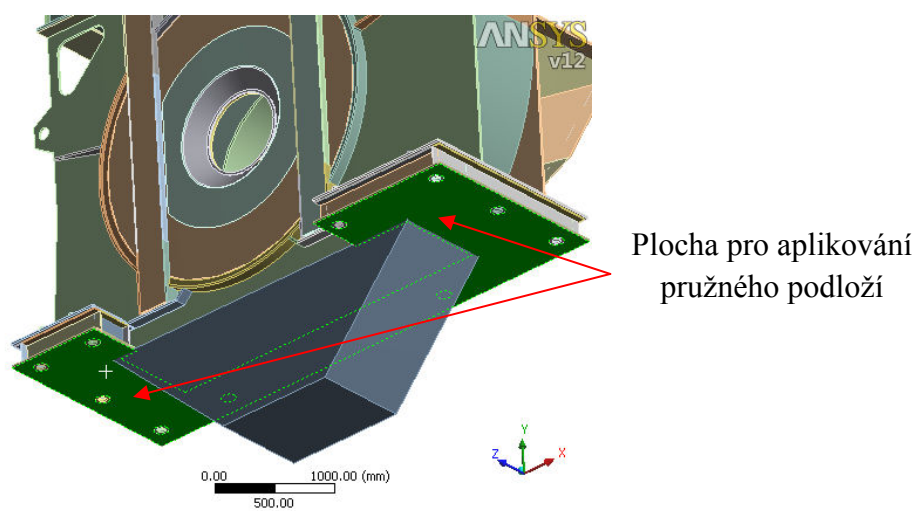
Obr.18 Kontaktní plocha při styku kotevního prvku (čep) s mezikružím (nábojem)



Obr.19 Horní plochy mezikruží

3.4.7. Usazení na betonovém podloží

Betonové podloží bylo do modelové soustavy zahrnuto v podobě elastické vazby zamezující posuvu patek v normálovém směru (osa y). Posuv patek mlýna je v horizontálním směru (x a z) umožněn. Předpokládá se, že tento pohyb bude zachycen kotevním prvky. Tuhost podloží $K = 1,47 \cdot 10^{10} \text{ [Nm}^{-3}\text{]}$ (dle [5]) je tabulková hodnota zohledňující složení betonové směsi a jeho stáří.



Obr.20 Aplikování pružného podloží

3.4.8. Vlastní tíha technické soustavy

Nezanedbatelným vlivem na napjatost a deformace má i vlastní tíha celé soustavy. Ta je respektována tíhovým zrychlením $g = 9,81 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$, které je zadáno každému uzlu diskretizovaného modelu.

3.4.9. Přehled vybraných modelovaných komponent konstrukční varianty A

1. Radiální pancéřování

- Zahrnuto v podobě tíhové síly

2. Třídič

- Pevně spojen s horní částí skříně → vzniklé deformace přeneseny v podobě uzlových posuvů do detailního modelu
- Vybrané nosníky zatíženy tíhovou silou odpovídající hmotnosti technologických a servisních zařízení

3. Vrata

- Pevně spojena se skříní v pantech a přitlačných šroubech, volně spojena mezi pryžovým těsněním a skříní (tření není uvažováno) → vzniklé deformace přeneseny v podobě uzlových posuvů do detailního modelu
- Rámu pojezdového kola umožněn posuv v horizontální rovině a natočení kolem osy pantů

4. Asfaltové podloží

- Pevně spojeno se skříní
- Plochy dotýkající se betonového podloží vetknuty

5. Kotevní prvky

- Nahrazeny okrajovou podmínkou zamezující normálovému posuvu všem uzlům na kontaktní válcové ploše mezi kotevní tyčí a plechem patky
- Uzlům náležícím ploše pod podložkou zamezen posuv ve vertikálním směru (směr y)

6. Usazení na betonovém podloží

- Zamezeno posuvu patek skříně v horizontální rovině (směry x a z)
- Aplikováno pružné podloží s tuhostí $K = 1,47 \cdot 10^{10} [Nm^{-3}]$ (dle [5])

7. Vlastní tíha

- Respektována tíhovým zrychlením $g = 9,81 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$

3.5. Teplotní analýza hrubé modelové soustavy

Na základě podkladů Ivitas a.s. [1] a [2] byly na vnitřní plochy vrat, skříně mlýna a třídiče zadány teploty v rozmezí od 200°C do 300°C. Nejvyšší teploty se vyskytují ve vratech a snižují se směrem k ústí třídiče.

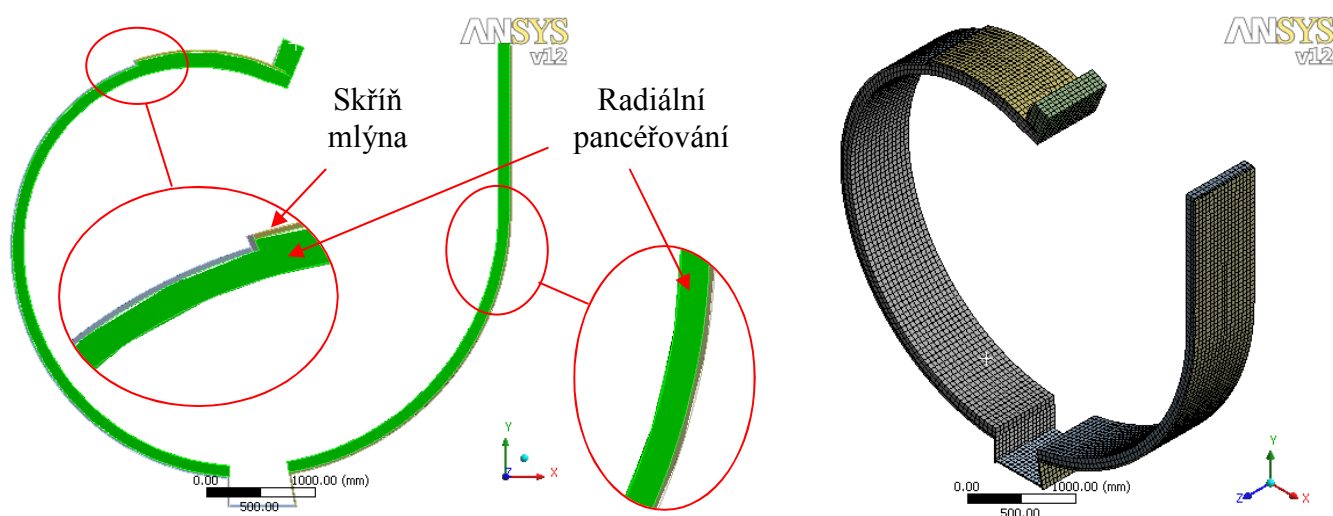
Na vnější povrch byl zadán odvod tepla volnou konvekcí v podobě koeficientu přestupu tepla $\alpha = 10 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$ a sáláním v podobě emisivity ocelových plechů $\varepsilon = 0,7 \text{ [–]}$ (dle [1], [7] a [15]). Referenční teplotou okolního vzduchu je 22°C. Výjimku tvořily vnější plochy asfaltového podloží a spodní plocha patek, kde se uvažuje dokonalá izolace betonovým podložím, a tudíž nulový odvod tepla.

Cílem této analýzy je získat rozložení teplotních polí, která budou aplikována do strukturální analýzy a budou tvořit podstatnou část zatížení dané soustavy.

3.5.1. Posouzení vlivu radiálního pancéřování

Tloušťka pancéřování (myšleno v radiálním směru) může do jisté míry ovlivnit teploty na vnitřní části skříně mlýna. Z tohoto důvodu je provedena teplotní analýza pro získání teplotních polí na vnitřních plochách spirálové části skříně mlýna.

Pro provedení dané teplotní analýzy byl vytvořen zjednodušený geometrický model sestávající se z radiálního pancéřování modelovaného jako celistvý kus (nikoli samostatné plechy) a přilehlých částí mlýnice.

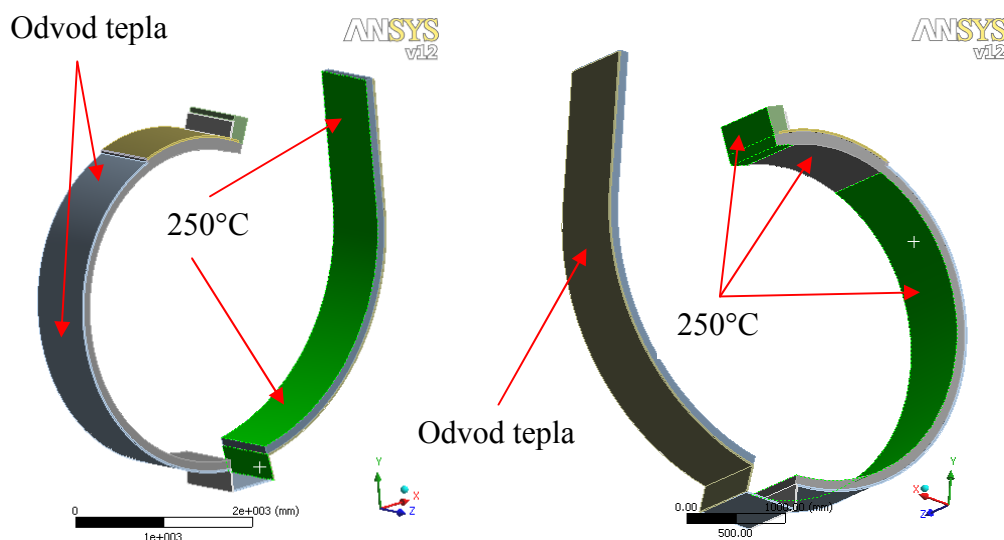


Obr.21 Geometrický model radiálního pancéřování a přilehlých částí mlýnice a jejich diskretizace konečnými prvky

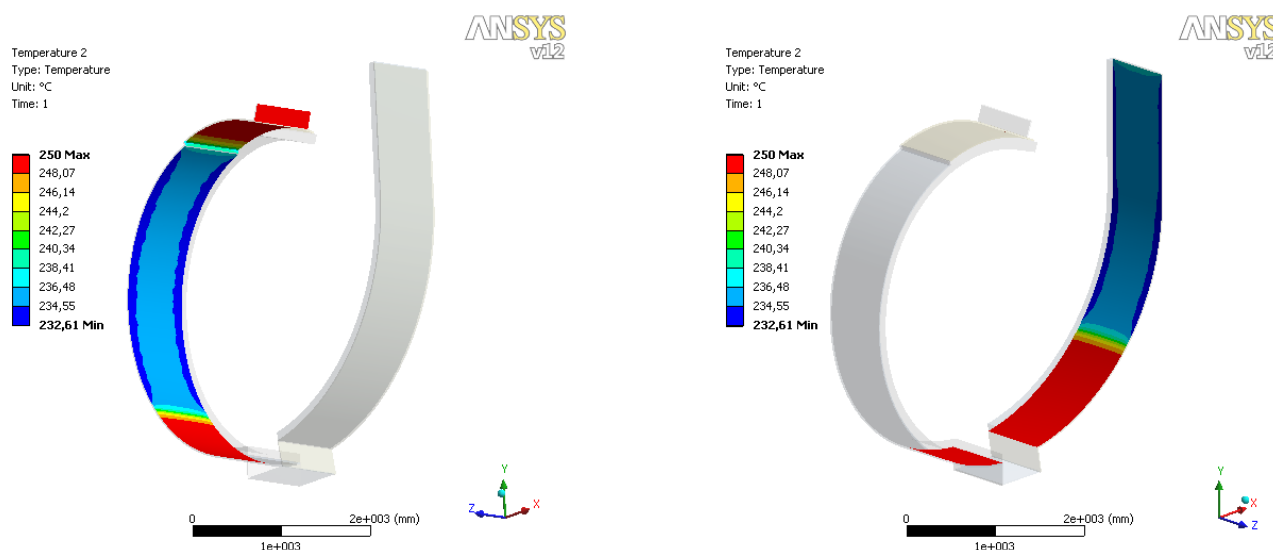
Statistika diskretizovaného modelu:

Počet prvků	11 200
Počet uzlů	48 600

Na vnitřní stranu radiálního pancéřování byla zadána teplota 250°C. Na vnější povrch byl zadán odvod tepla volnou konvekcí v podobě koeficientu přestupu tepla $\alpha = 10 [W m^{-2} K^{-1}]$ a sáláním v podobě emisivity ocelových plechů $\varepsilon = 0,7 [-]$ (dle [1], [7] a [15]). Referenční teplotou okolního vzduchu je 22°C



Obr.22 Plochy pro zadání teplot a odvodu tepla

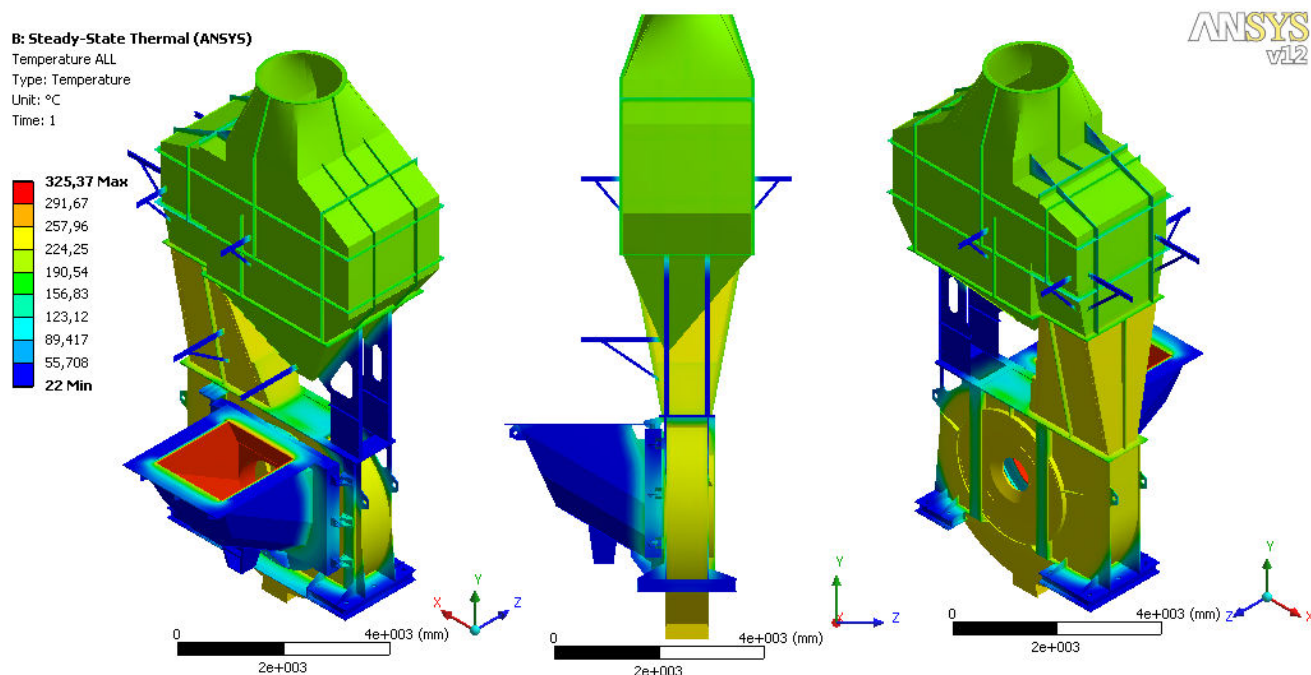


Obr.23 Teplotní pole na vnitřní spirálové části skříně mlýna

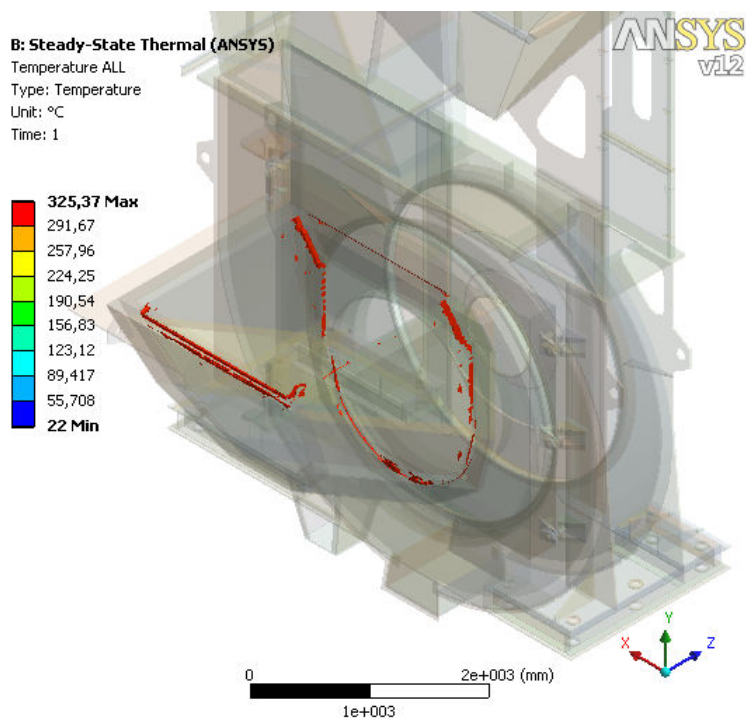
Z obrázku 23 je patrný pokles teplot na vnitřních plochách spirálové části skříně mlýna na 235°C.

3.5.2. Rozložení teplot hrubé modelové soustavy

Z obrázku 24 je patrné rozložení teplot hrubé modelové soustavy konstrukční varianty A. Maximální teplota vzrostla ze zadaných 300°C až na teplotu 325°C. Na obrázku 25 jsou zobrazeny oblasti s teplotami vyššími než 300°C. Je z něj patrné, že veškeré tyto teploty se nacházejí ve vratech mlýna, a to konkrétně na rozhraní žárobetonu a vnitřního ocelového pláště. Tento jev se dá přisoudit nepřesné diskretizaci, neboť vratům mlýna včetně žárobetonu nebyla přisuzována vysoká priorita a byly diskretizovány velmi hrubou MKP sítí.



Obr.24 Rozložení teplot hrubé modelové soustavy



Obr.25 Teplotní špičky ve vratech mlýna

3.6. Strukturální analýza hrubé modelové soustavy

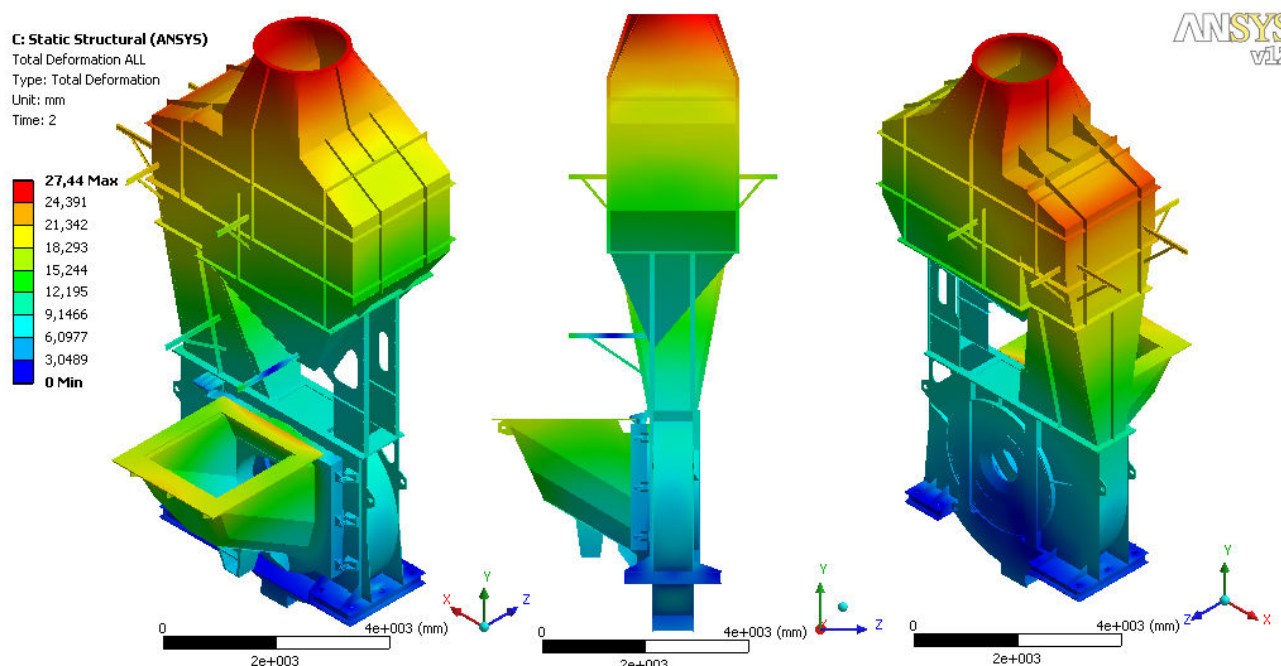
Teplotní pole získaná z předchozí analýzy, respektující zatížení teplotami, bylo doplněno zatížením od vlastní hmotnosti soustavy, zatížením od hmotnosti radiálního pancéřování a zatížením od hmotnosti plošin a klapek v třídiči. Jednotlivé zatěžující prvky jsou popsány v kapitolách 3.4.1. Radiální pancéřování, 3.4.3 Přídavná hmotnost třídiče a 3.4.8. Vlastní tíha technické soustavy.

3.6.1 Deformační analýza

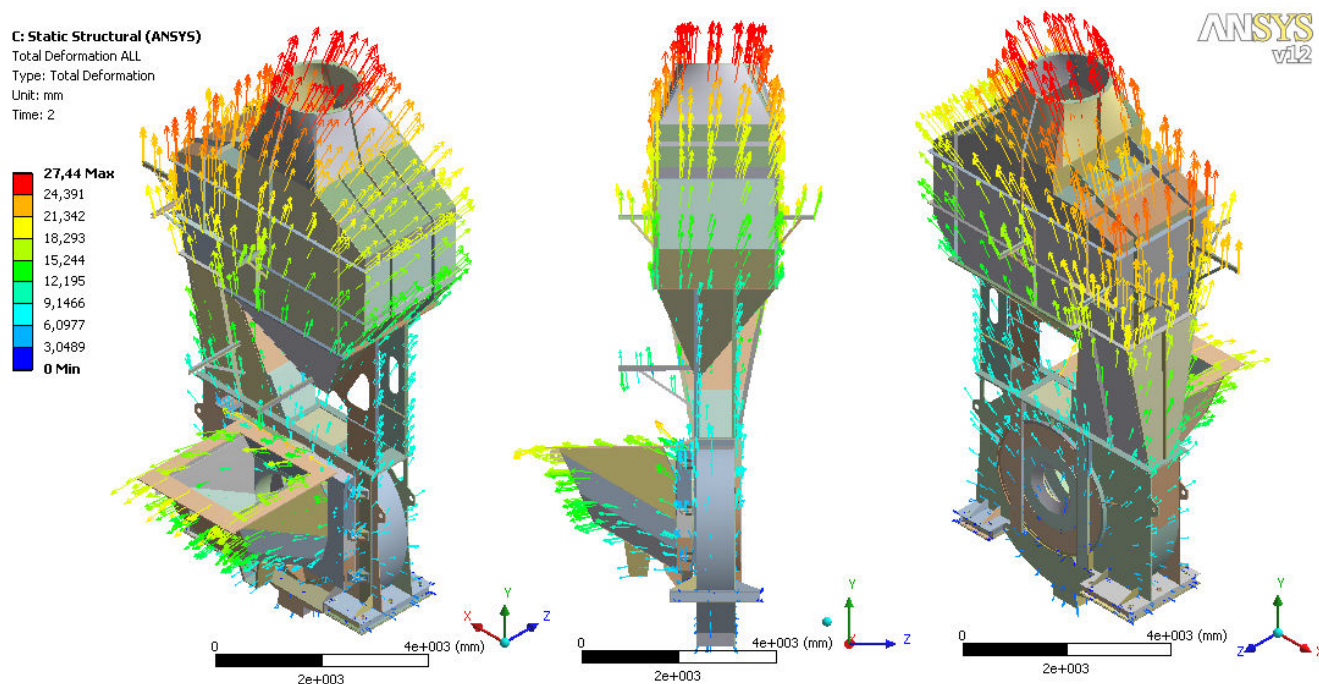
Na obrázku 26 jsou vyobrazeny celkové posuvy technické soustavy. K maximálním posuvům dochází v horní části třídiče, téměř $27,5\text{ mm}$.

Při vektorovém zobrazení (obr. 27) lze přesněji zkoumat jednotlivé posuvy. Skříň se deformuje v kladném i záporném smyslu osy x , naproti tomu třídič převážně v kladném smyslu osy y . Z toho vyplývá, že vlastní tíha a silové zatížení simulující klapky a plošiny třídiče nemá na tyto deformace takový vliv, jako teplotné zatížení.

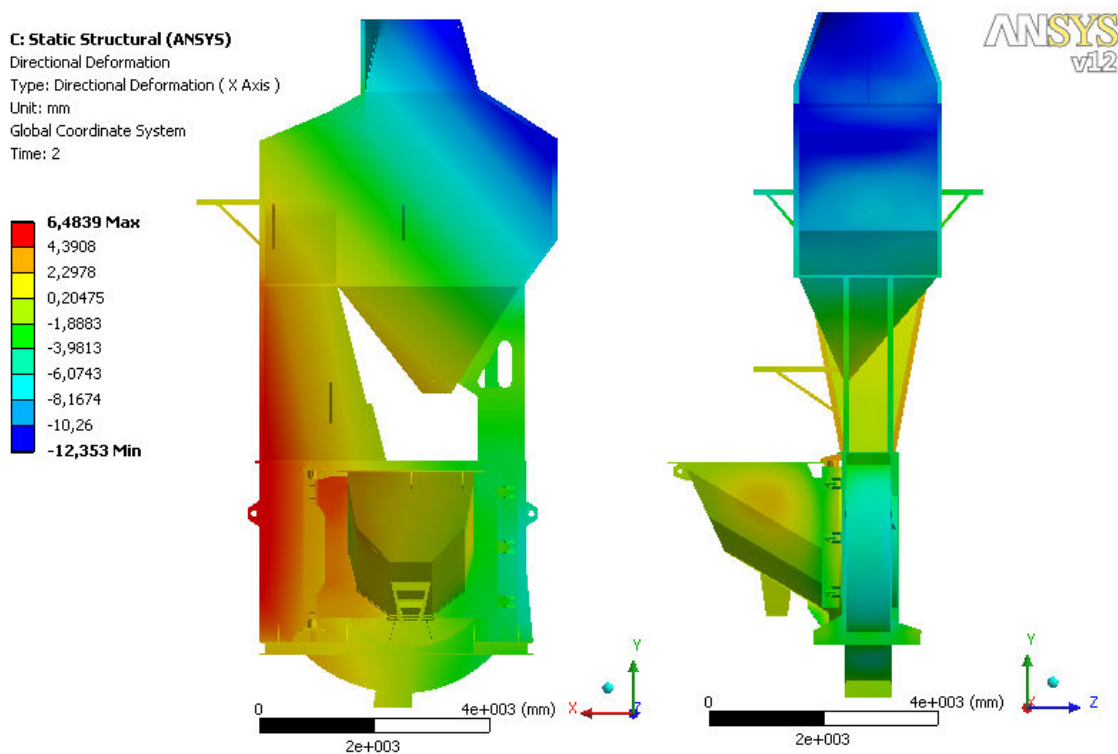
Na obrázcích 28, 29 a 30 jsou vykresleny posuvy v jednotlivých směrech.



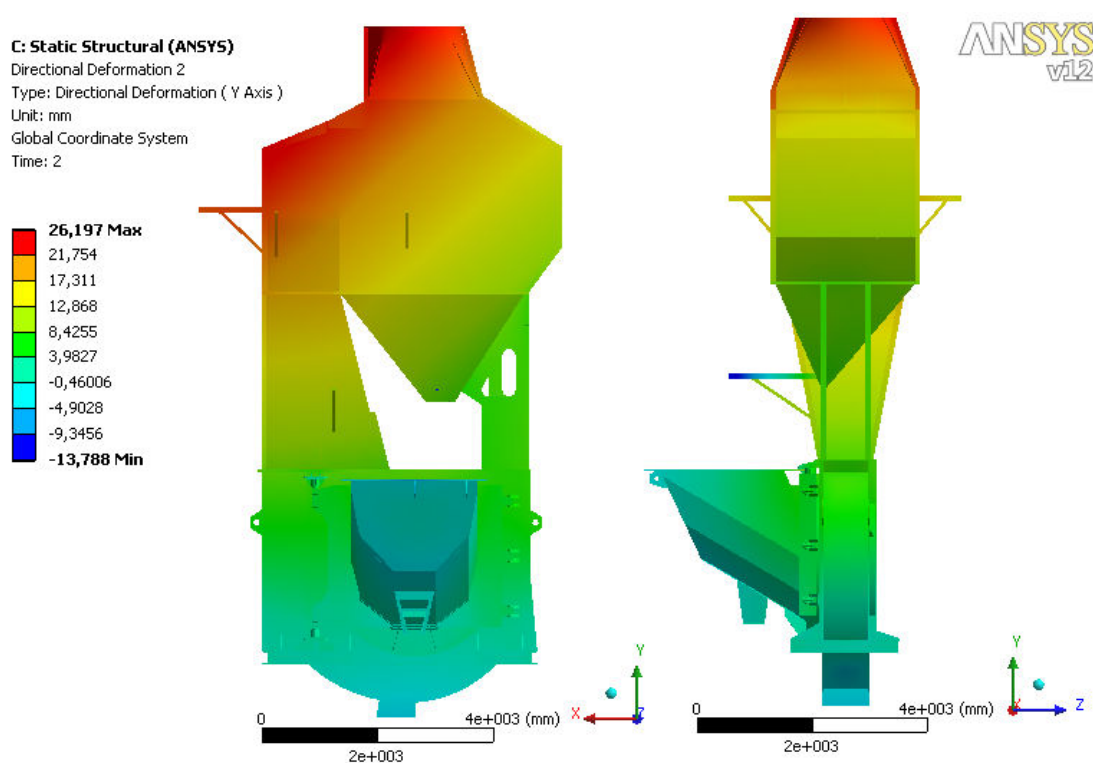
Obr.26 Celkové posuvy



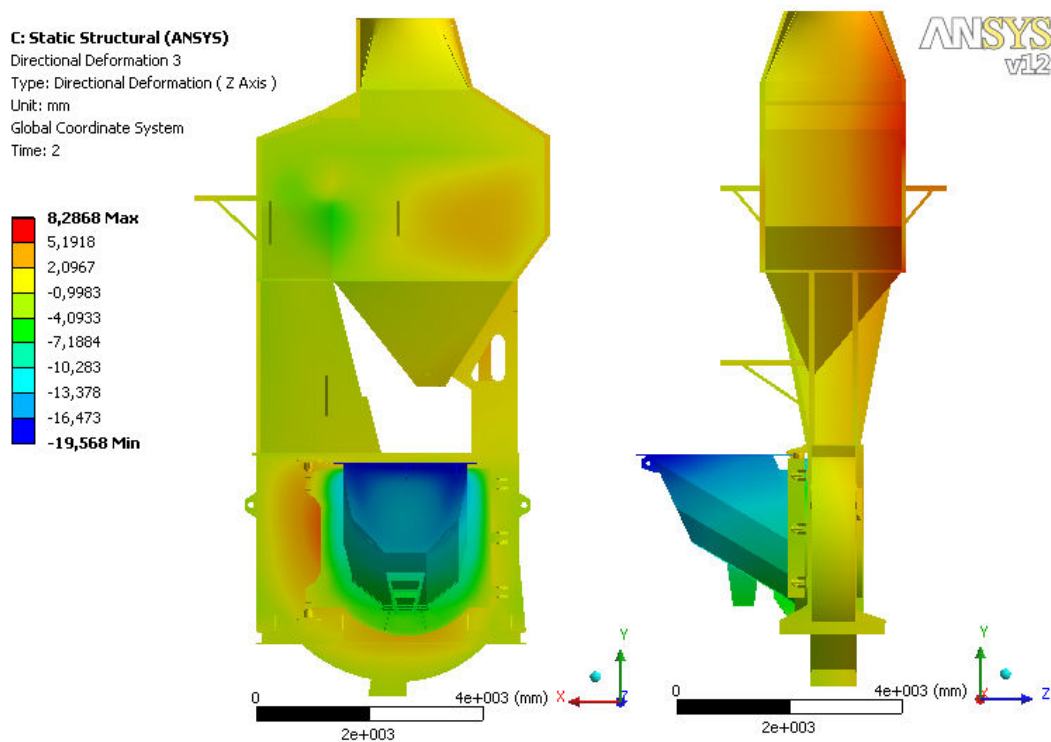
Obr.27 Celkové posuvy - vektorově



Obr.28 Posuvy ve směru x



Obr.29 Posuvy ve směru y



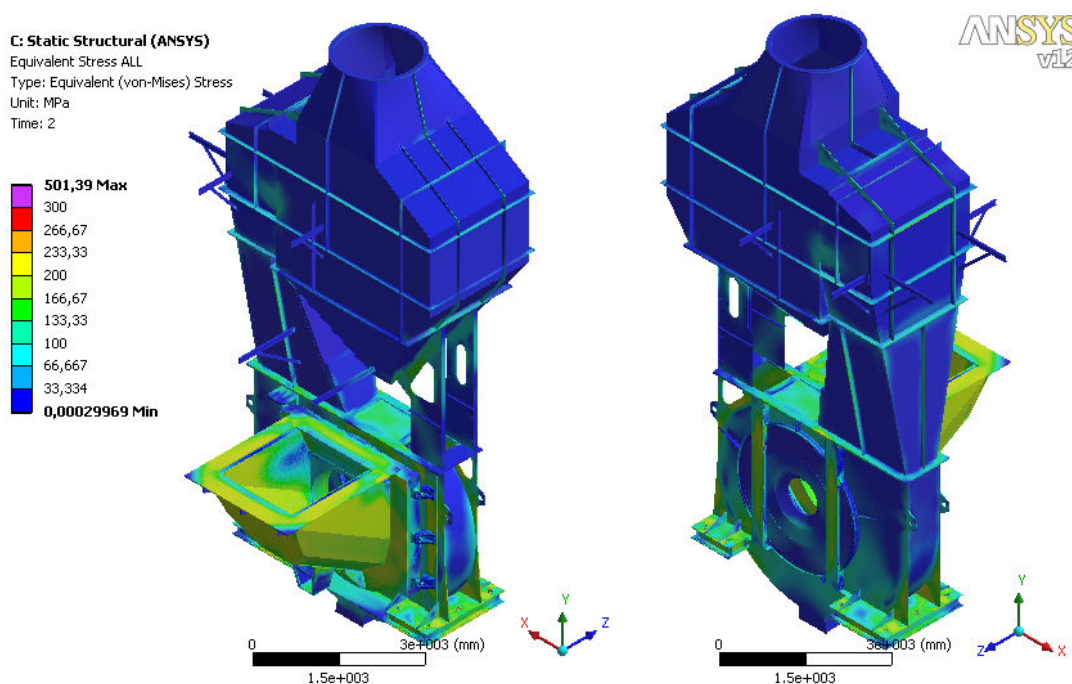
Obr.30 Posuvy ve směru z

3.6.2 Napěťová analýza

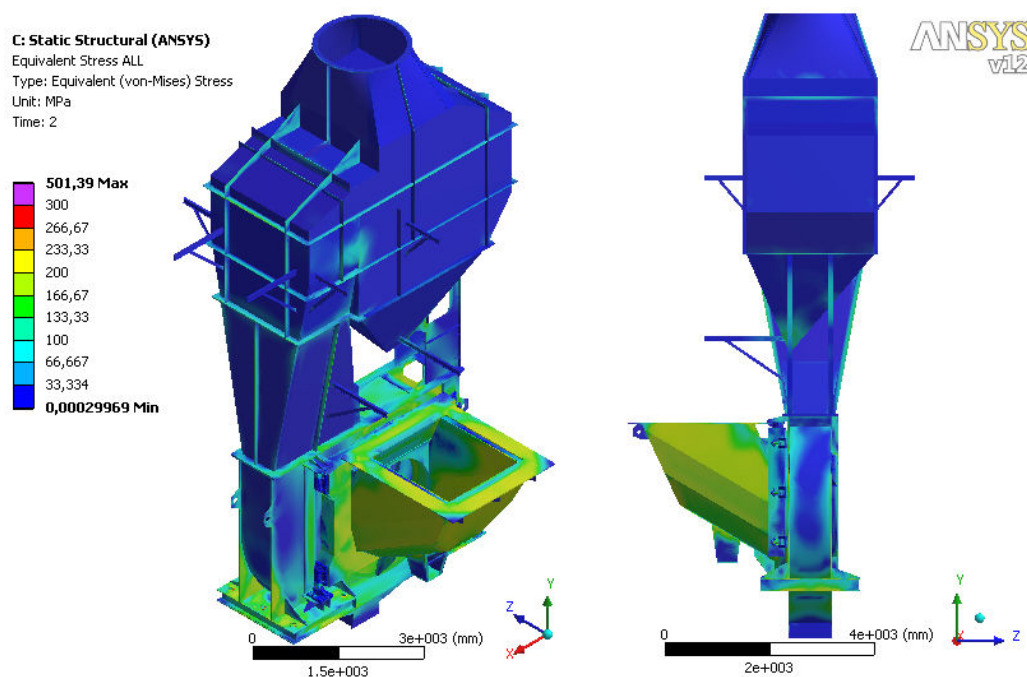
V materiálovém modelu konstrukční oceli byl zadán bilineární izotropní materiálový model s mezí kluzu 300 MPa , předpokládající vznik plastickým deformací po dosažení meze kluzu. Přesto se vyskytly v hrubé modelové soustavě oblasti okolo kotevních prvků v patkách skříně, kde špičky redukovaného napětí dle hypotézy HMH dosáhly až 500 MPa .

Níže na obrázcích 33 a 34 jsou zobrazeny plastické deformace s poměrem 0,00001 a 0,01. Zobrazeny jsou oblasti s plastickou deformací rovnou, popř. větší než je daný poměr. Vznik špiček redukovaného napětí přesahujícího mez kluzu lze připsat nepřesné diskretizaci modelu. Při srovnání obrázku 36 zobrazující oblasti s napětím překračujícím 300 MPa a 35 zobrazující oblasti, v nichž dochází k plastickým deformacím, získáme potvrzení o předpokladu nesprávné diskretizace daných oblastí. V místech styku kotevního prvku a plechu patky dochází k místním plastickým deformacím, které nejsou dokonale postihnuty v určitých prvcích numerického modelu.

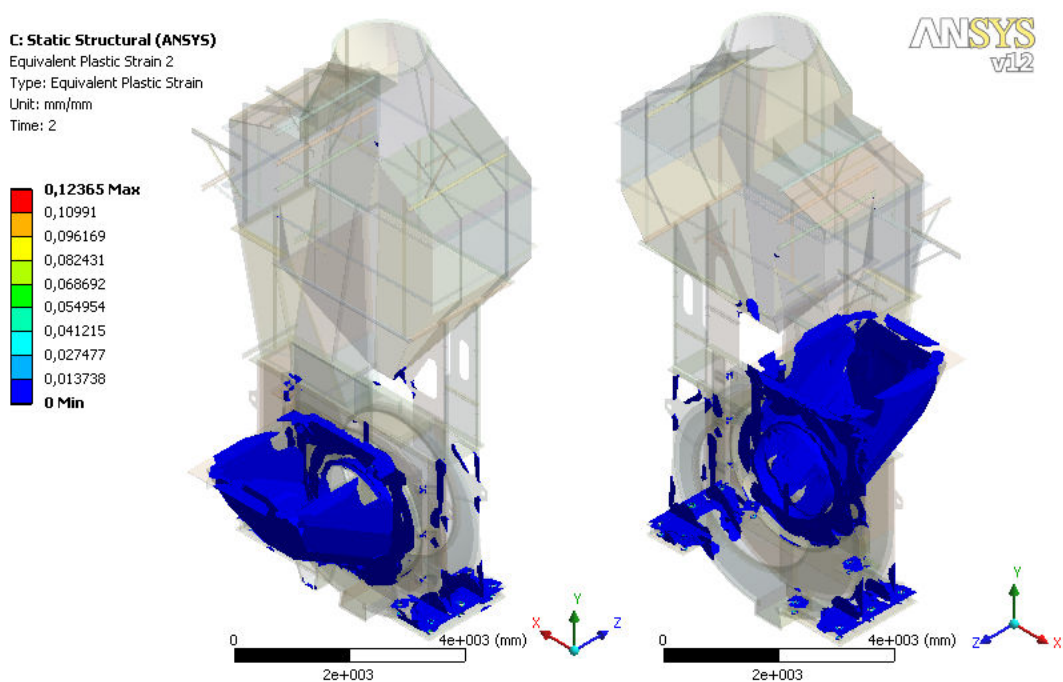
V důsledku velkého teplotního spádu (obr. 37) se vyskytují na vnitřním i vnějším plášti vrat velmi vysoké hodnoty redukovaného napětí (obr. 38). Na obrázcích 33 a 34 je možno pozorovat výskyt plastických deformací v plášti vrat a lokálně také v třidiči. Jejich velikost je ovšem nevýznamná.



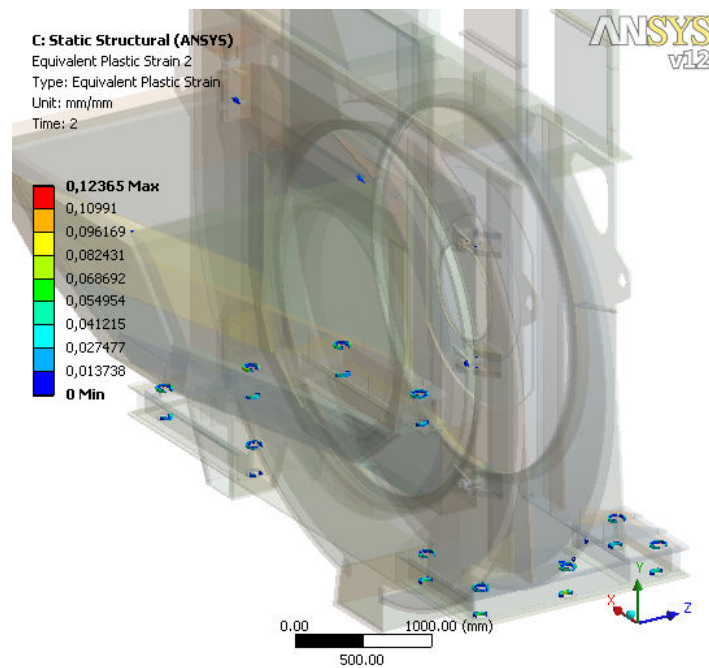
Obr.31 Průběh redukovaného napětí dle HMH – pohled 1



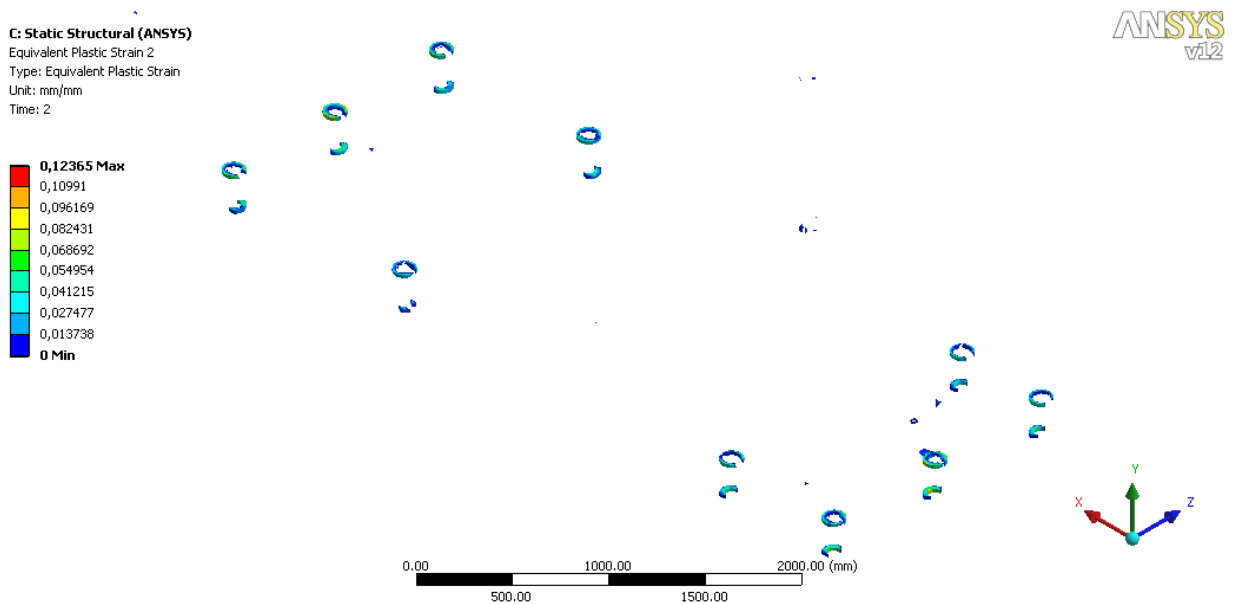
Obr.32 Průběh redukovaného napětí dle HMM – pohled 2



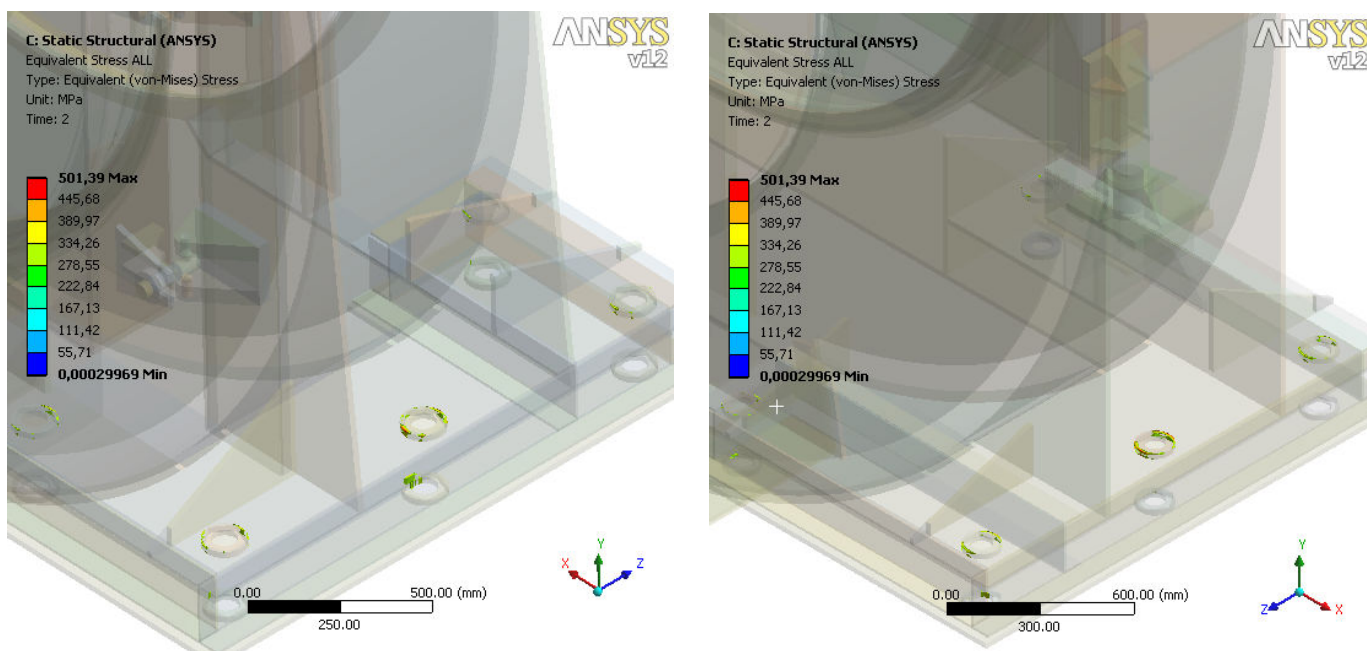
Obr.33 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,00001



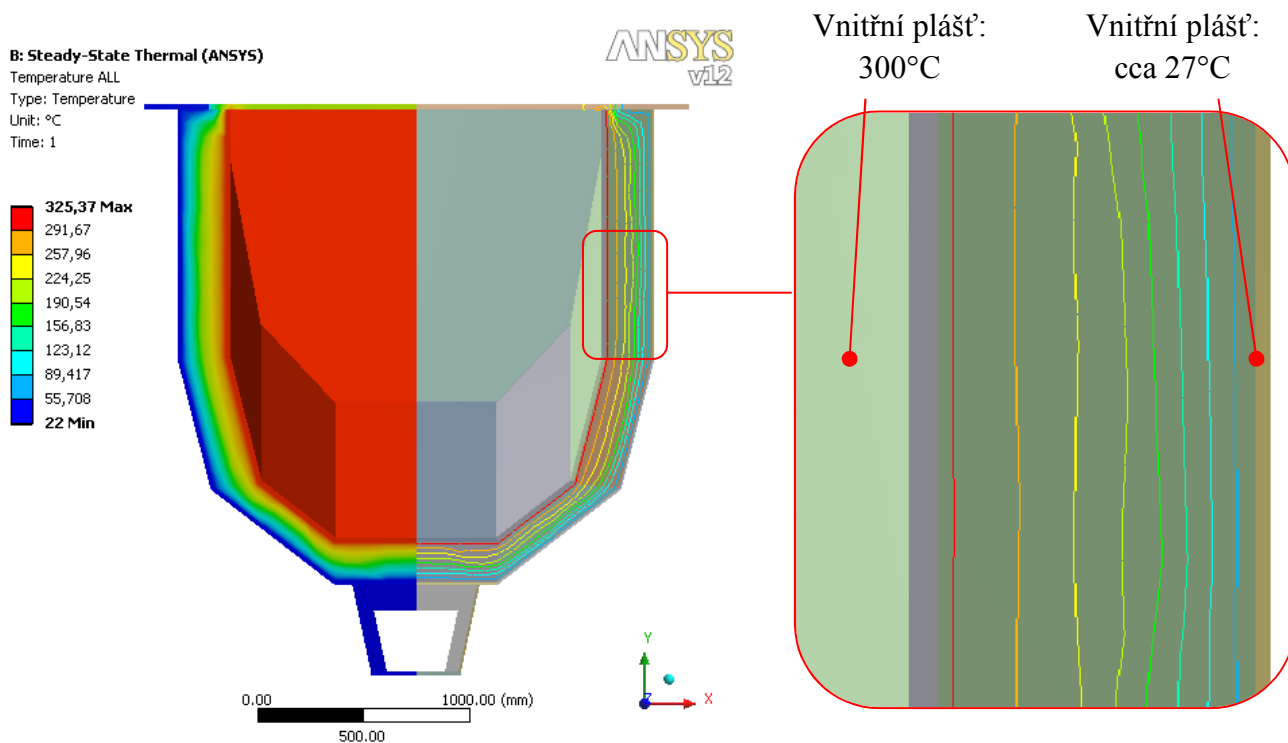
Obr.34 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,01



Obr.35 Plastická deformace – detailní pohled na oblasti okolo kotevních prvků – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,01



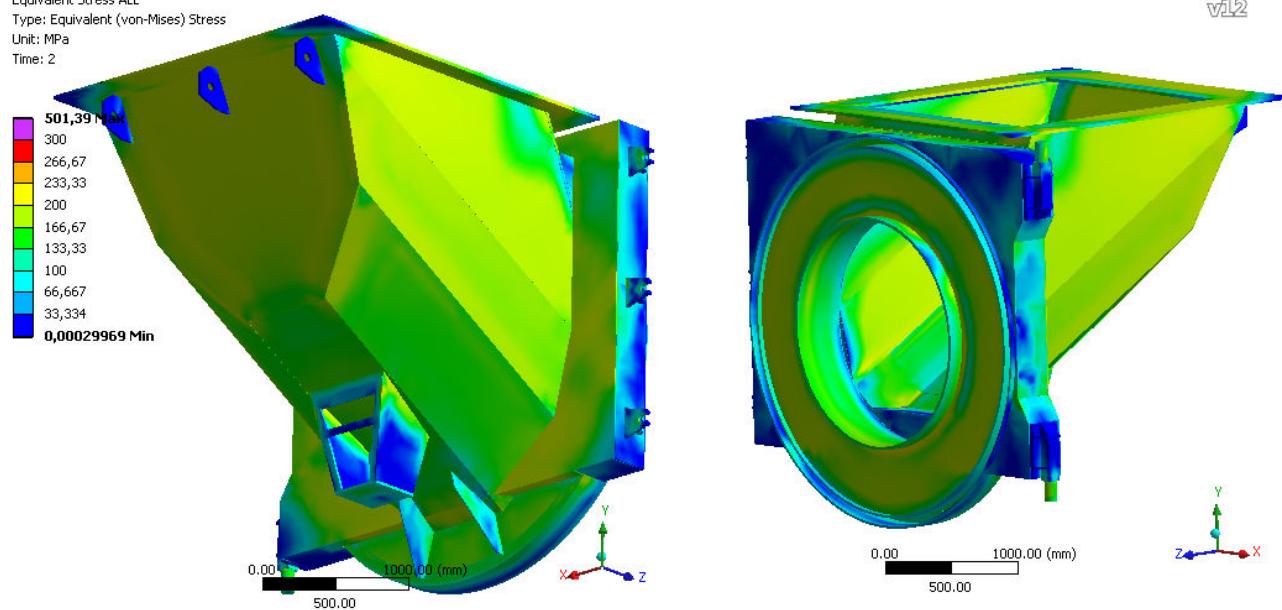
Obr.36 Rozložení redukovaného napětí dle HMH v oblastech okolo kotevních prvků v levé a pravé patce, přesahující 300 MPa



Obr.37 Řez vraty – rozložení teplot kontinuálně (levá polovina) a pomocí izolinií (pravá polovina)

C: Static Structural (ANSYS)
Equivalent Stress ALL
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2

ANSYS
v12

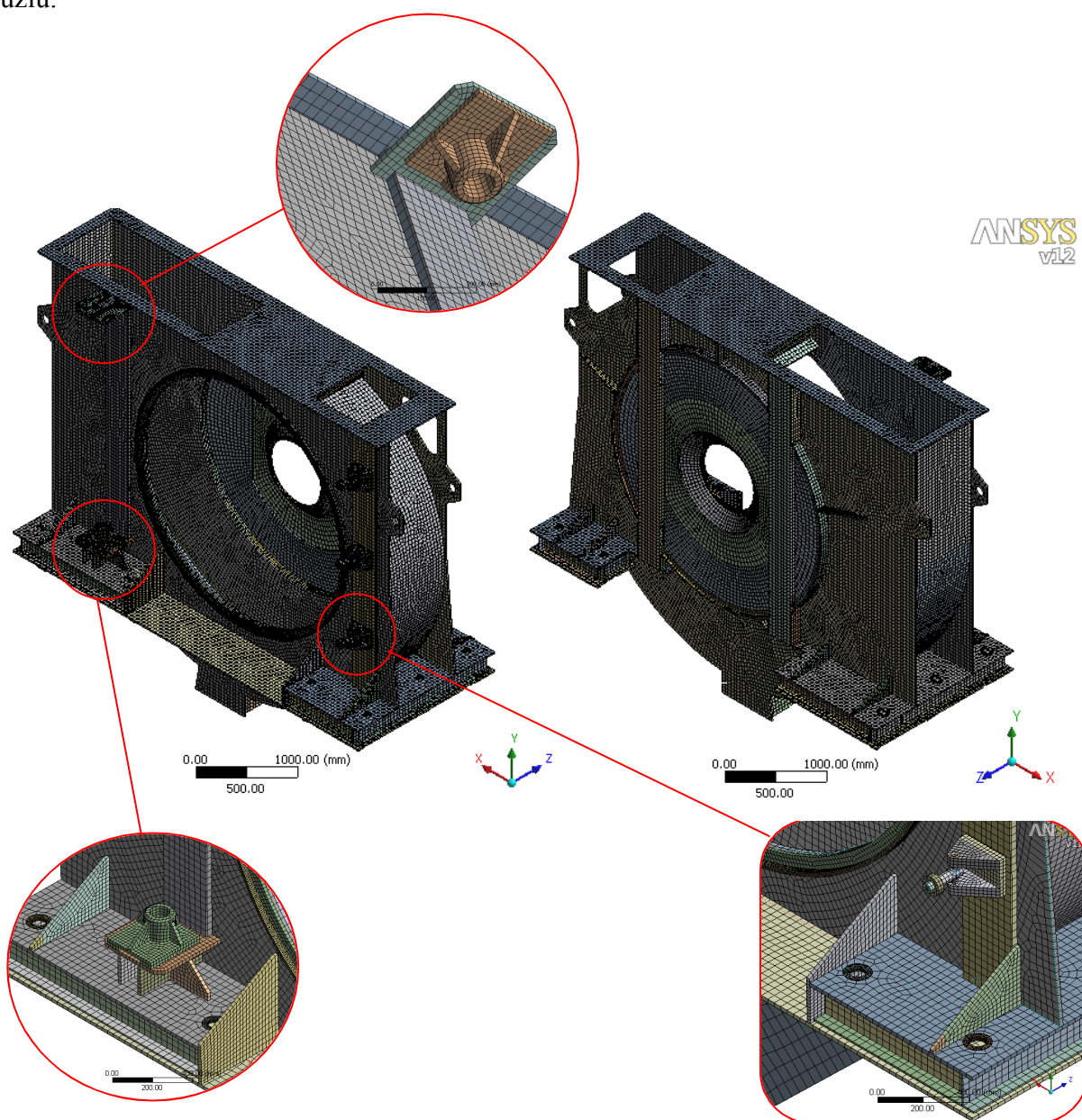


Obr.38 Rozložení redukovaného napětí dle HMM

3.7. Detailní model

S hrubou modelovou soustavou se shoduje materiálový a geometrický model, který je omezen pouze na skříně mlýna. Diskretizován byl mnohem větším počtem prvků, což má za následek detailnější matematický popis zkoumaného tělesa a tudíž je zde předpoklad pro získání věrohodnějších výsledků. Důraz byl kladen především na oblasti, odkud jsou přenášeny uzlové posuvy a uzlové teploty z hrubé modelové soustavy (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní) a také na oblasti patek.

Diskretizovaný model je tvořen přibližně 200 000 elementy, kterým odpovídá 684 000 uzlů.

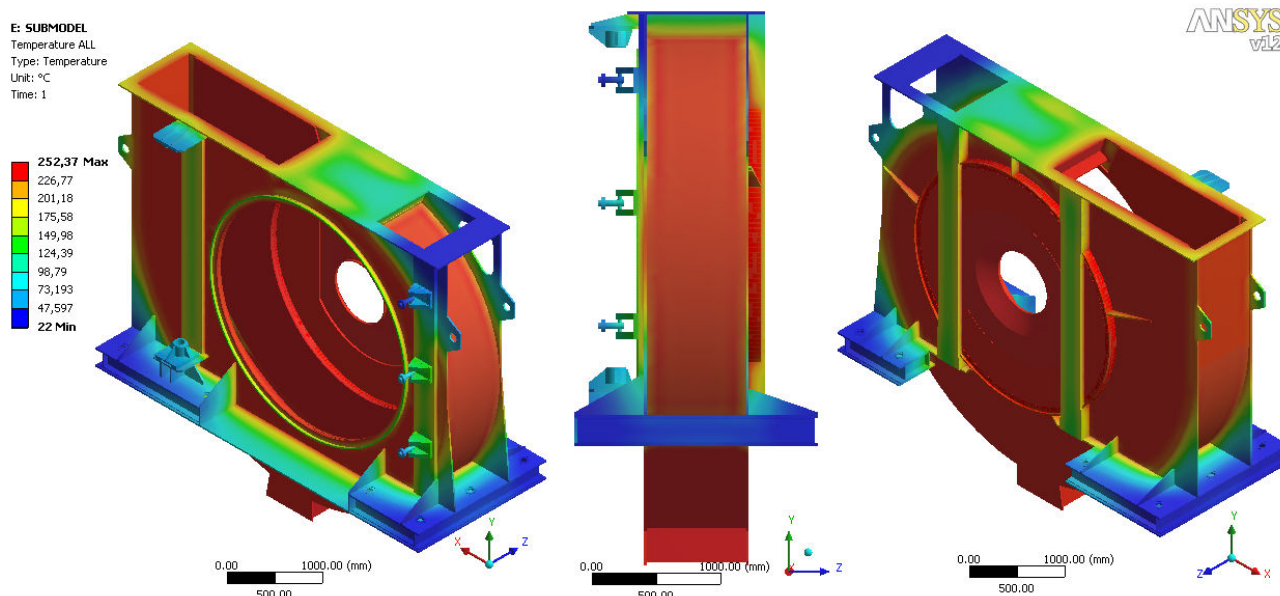


Obr.39 Diskretizace detailního modelu

3.7.1 Teplotní analýza detailního modelové soustavy

Při použití metody submodelingu bylo nutné na detailním modelu provést opětovně teplotní analýzu. Byly přeneseny uzlové teploty vybraných ploch (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní), veškeré další vstupy pro výpočet jsou shodné s hrubou modelovou soustavou a jsou uvedeny v kapitole 3.5 Teplotní analýza hrubé modelové soustavy. Jedná se o:

- Vnitřní povrchové teploty ve vratech, skříní a třídiči v rozsahu 200°C až 300°C (zde uplatněny pouze teploty týkající se skříně mlýna)
- Odvod tepla volnou konvekcí a sáláním do okolního vzduchu



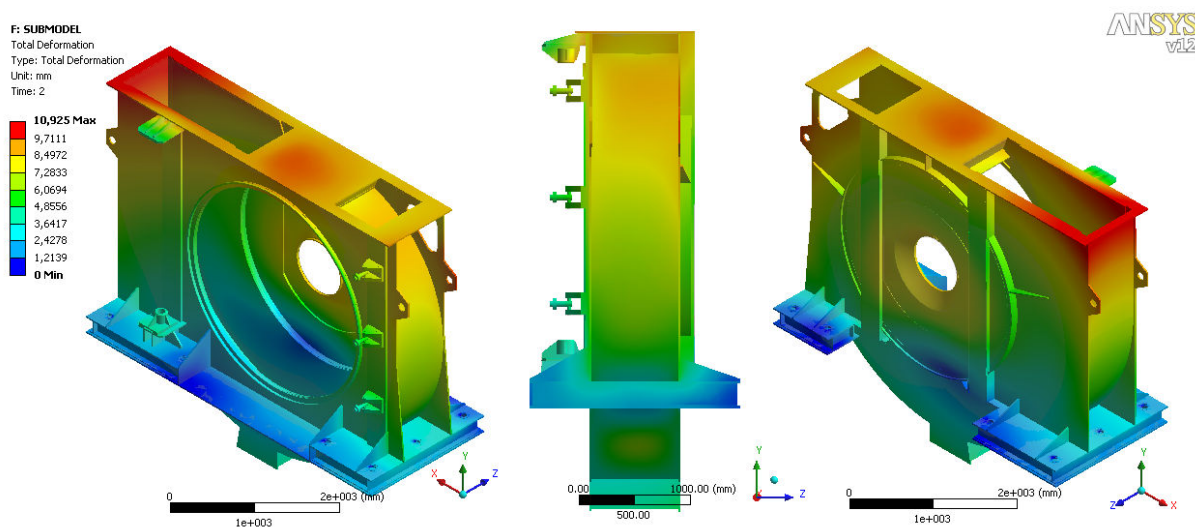
Obr.40 Rozložení teplot detailní modelové soustavy

3.7.2 Strukturální analýza detailního modelu

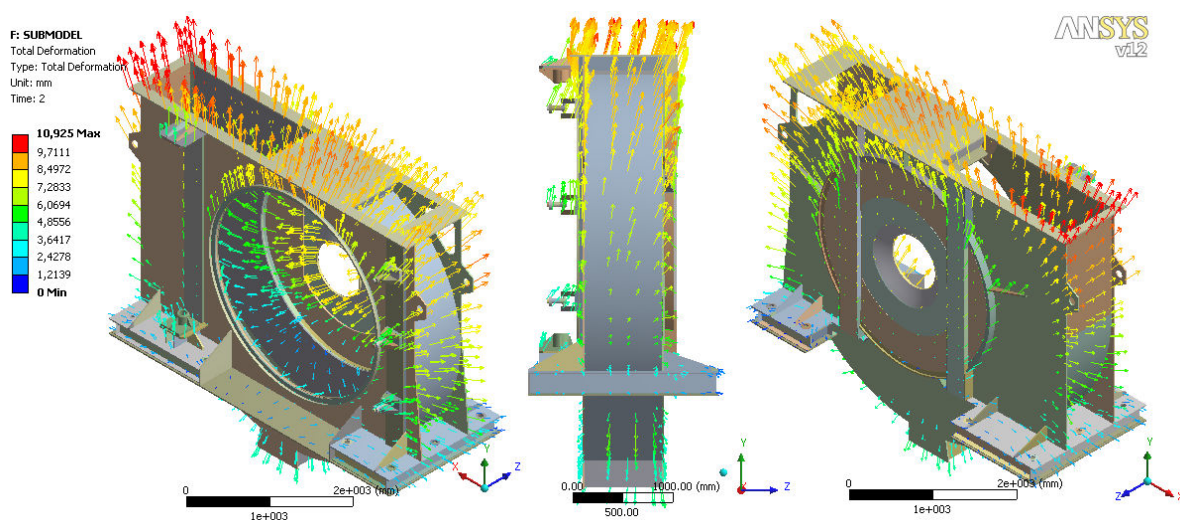
Zatížení při této analýze tvoří uzlové posuvy a uzlové teploty vybraných ploch (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní), které jsou zde přeneseny z hrubé modelové soustavy, vlastní tíha respektována tíhovým zrychlením $g = 9,81 [ms^{-2}]$ a tíhová síla odpovídající radiálnímu pancéřování.

3.7.2.1 Deformační analýza

K největším celkovým posuvům dochází v horní části skříně (obr. 41 a 42) v blízkosti horního pantu. Na obrázcích 43, 44 a 45 jsou vykresleny posuvy v jednotlivých směrech, z nich vyplývá, že největší podíl na této deformaci mají posuvy v kladném smyslu osy y . Ve směru osy x se skříň deformuje téměř symetricky vzhledem k vstupnímu otvoru hřídele. V důsledku roztahování ve směru x dochází k propadu čelní a týlní strany směrem dovnitř mlýnice (patrně také z obr. 45 a 46, kde jsou uvedeny posuvy s 10-ti násobným zvětšením).

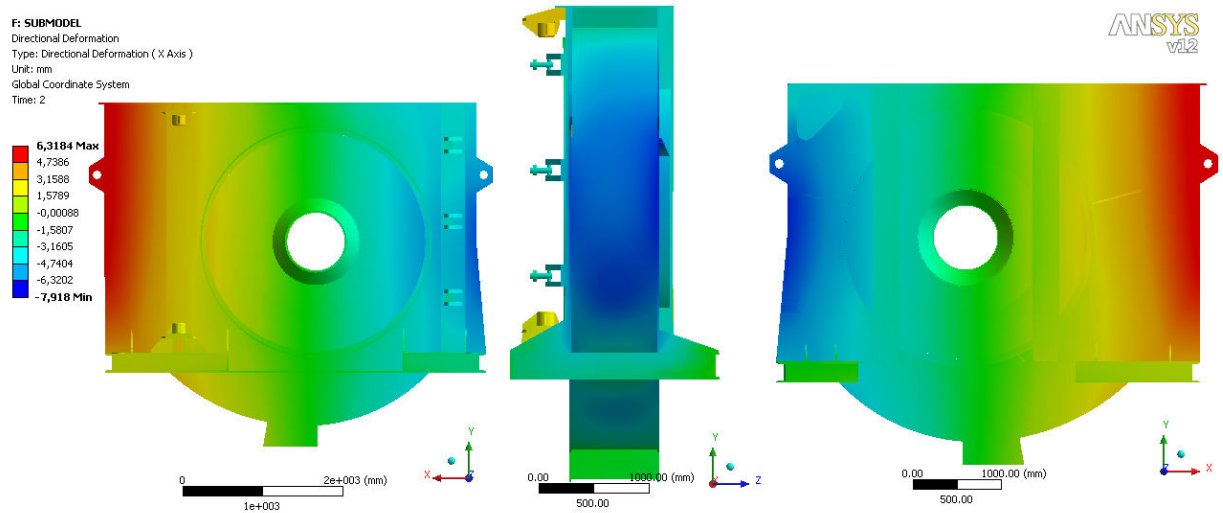


Obr.41 Celkové posuvy

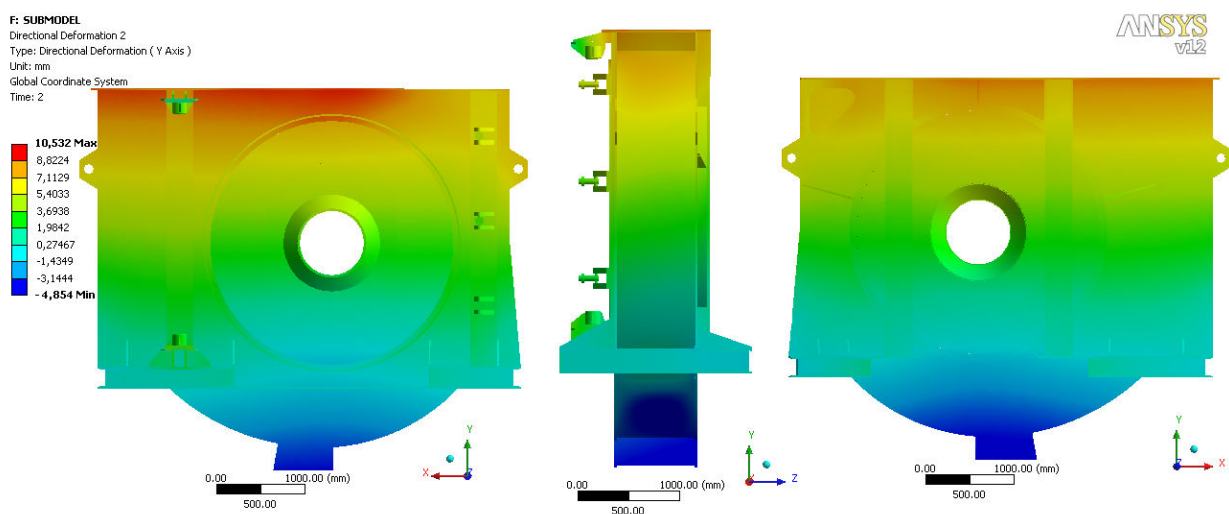


Obr.42 Celkové posuvy - vektorově

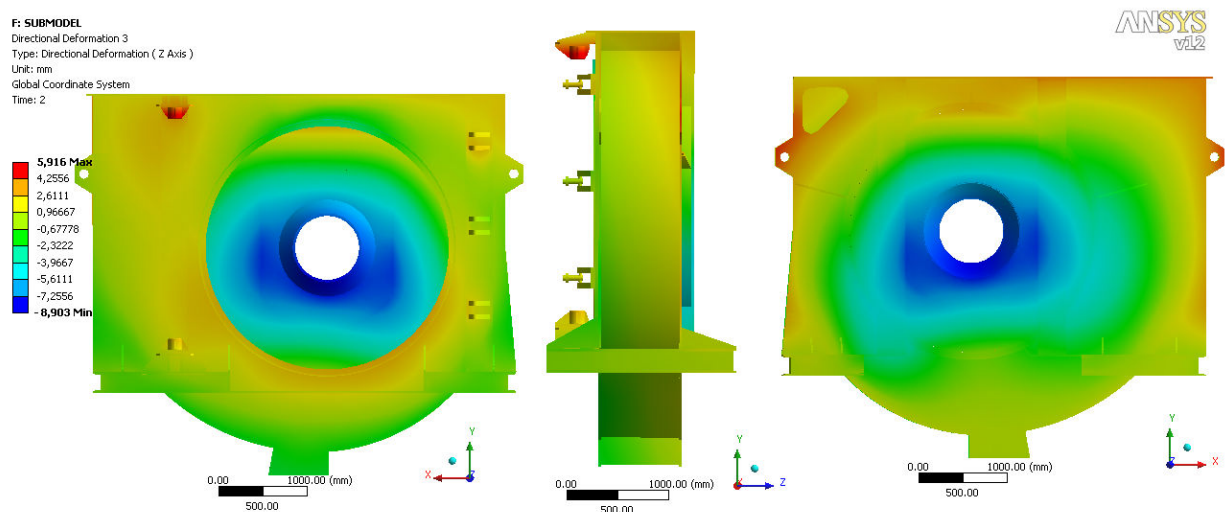
Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



Obr.43 Posuvy ve směru x



Obr.44 Posuvy ve směru y



Obr.45 Posuvy ve směru z

F: SUBMODEL

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 2

10,925 Max

9,7111

8,4972

7,2833

6,0694

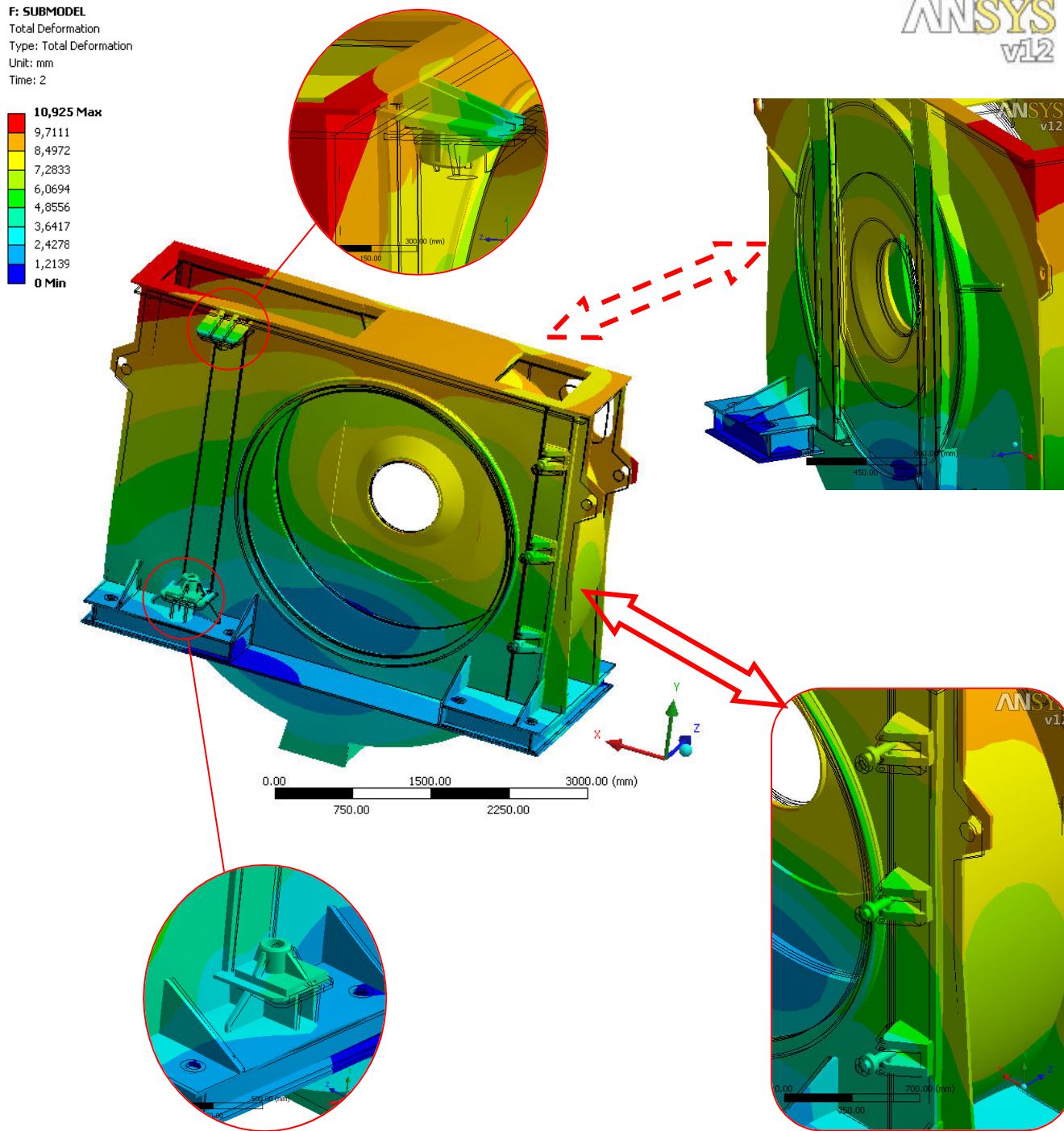
4,8556

3,6417

2,4278

1,2139

0 Min



Obr.46 Celkové posuvy zobrazeny s 10-ti násobným zvětšením a s vykreslenými konturami
nedeformované skříně mlýna

3.7.2.2 *Napět'ová analýza*

Díky přesnější diskretizaci lze pozorovat rovnoměrnější rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM a snížení špičky napětí na 370 MPa oproti hrubé modelové soustavě.

Hodnoty největšího redukovaného napětí se objevují v patkách, a to především v oblastech okolo kotevních prvků (obr. 47 a 48). V těchto místech se také vyskytují plastické deformace (obr. 49 a 50). Zobrazeny jsou oblasti s poměrem rovným, popř. větším než 0,01 resp. 0,05. Maximální hodnota plastických deformací činí 0,081. Na základě této hodnoty a v kombinaci s rozložením daných deformací lze konstatovat, že nemají vliv na činnost technické soustavy.

Místa, kde dvě, popř. všechna tři hlavní napětí jsou tahová, vzniká nebezpečí vzniku trhlin. Rozložení těchto napětí je patrný z obrázků 51, 52 a 53. Vzhledem k výskytu špiček napětí okolo kotevních prvků, bylo nutné upravit stupnici tak, aby rozložení napětí na povrchu skříně byl transparentnější. U každého z napětí se vyskytují fialové a šedé oblasti, které jsou vyšší, resp. nižší než zvolená horní mez. Ze srovnání těchto rozložení vyplývá, že na skříně mlýna se nenachází žádné konkrétní místo, které by bylo nebezpečné z hlediska možnosti vzniku trhlin. Patky jsou analyzovány zvlášť na obrázcích 54, 55 a 56. Zde již stupnice napětí není nijak upravována. Nepřesnosti při numerickém řešení se zde vyskytují ve větším množství než v ostatních částech tělesa. V těsné blízkosti jsou zde oblasti s maximální i minimální hodnotami, na jejichž základě není možno vyslovit konečné závěry. Z obrázků jasně vyplývá, že oblasti okolo kotevních prvků jsou nejkritičtější místem celé technické soustavy a je zde největší pravděpodobnost vzniku trhlin.

F: SUBMODEL

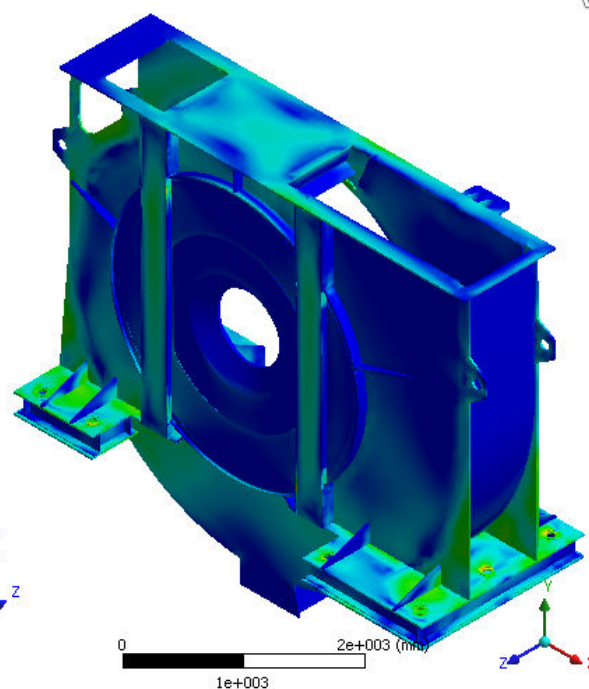
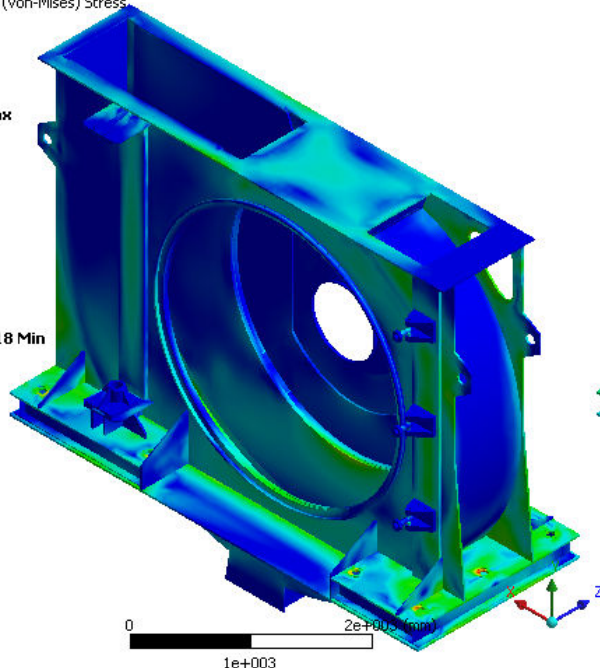
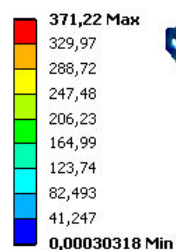
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

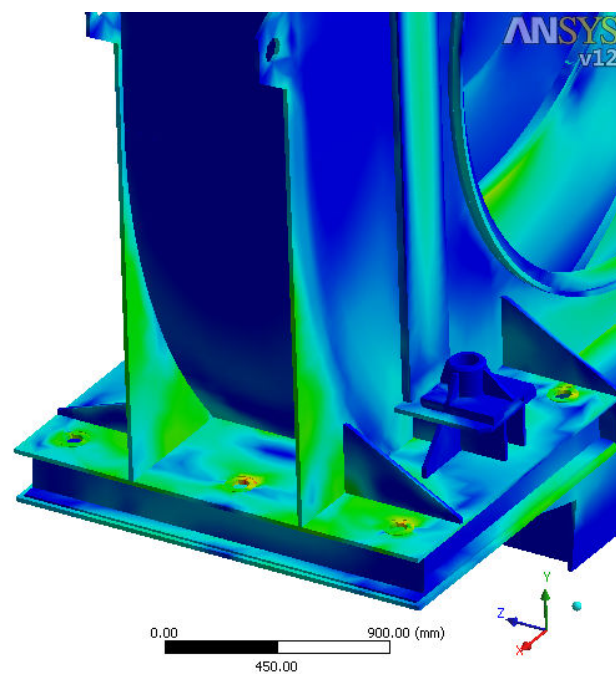
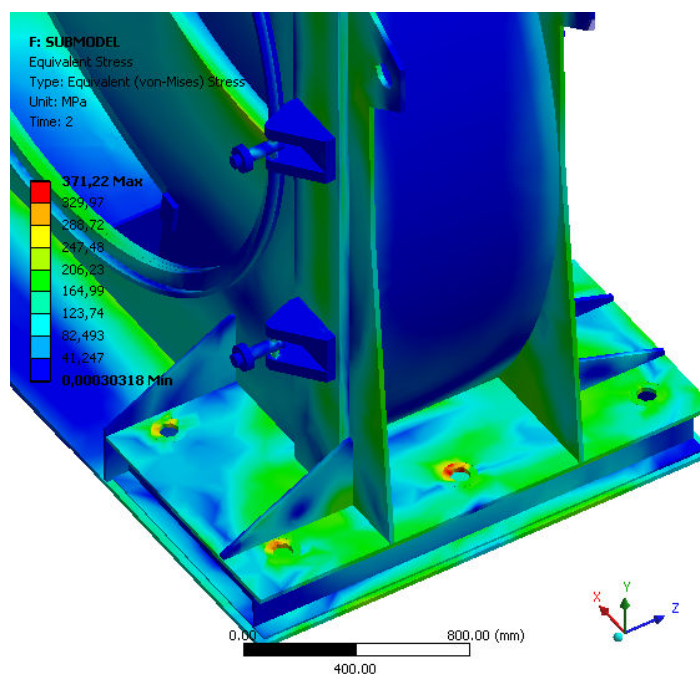
Unit: MPa

Time: 2

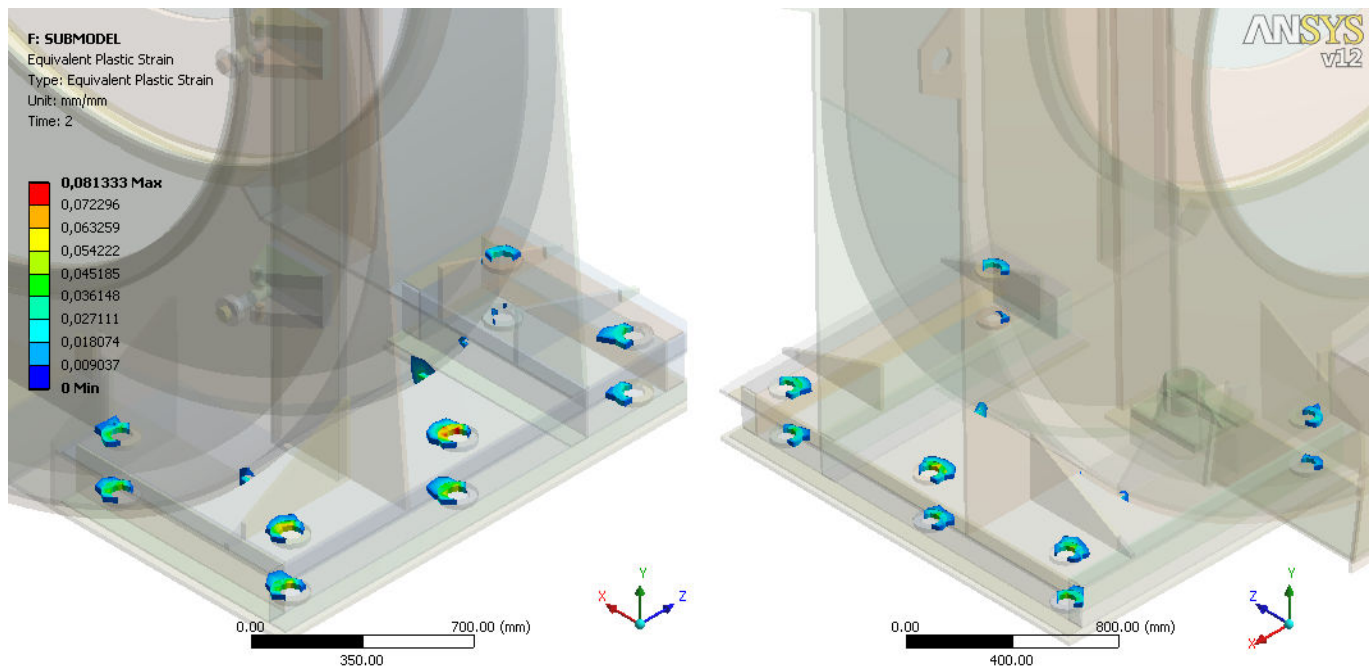
ANSYS
v12



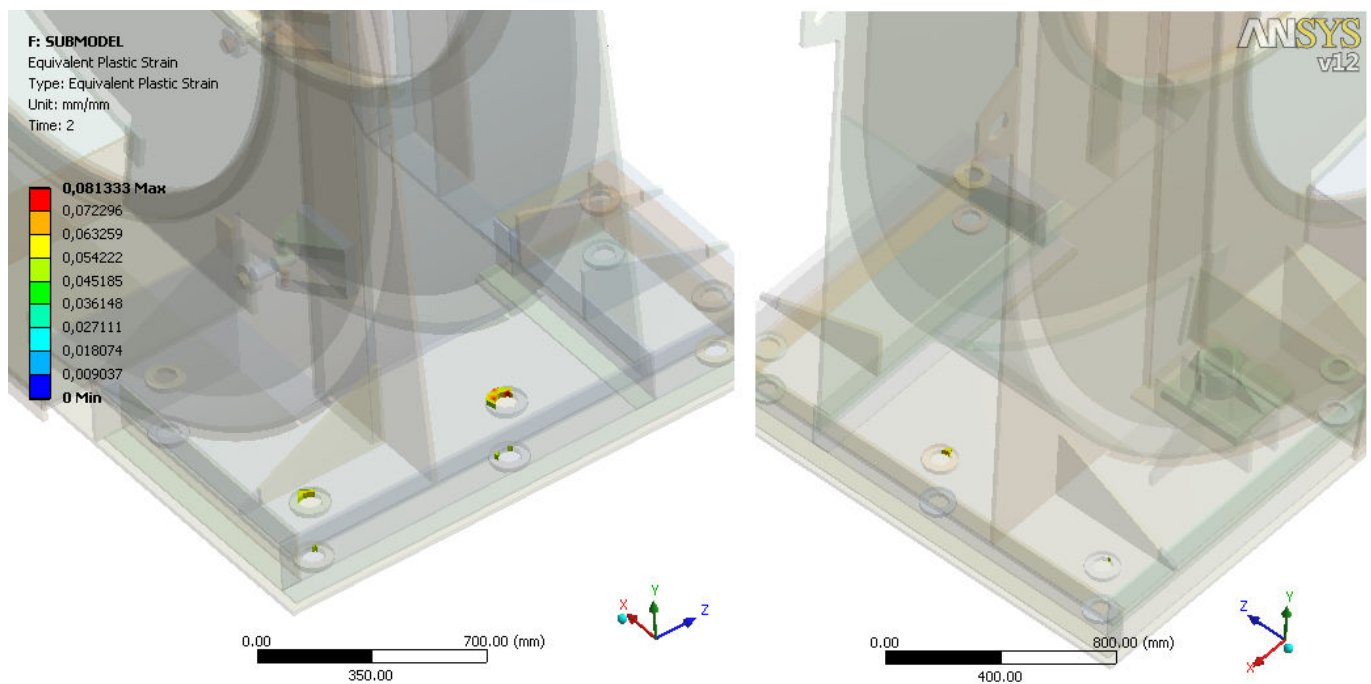
Obr.47 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 1



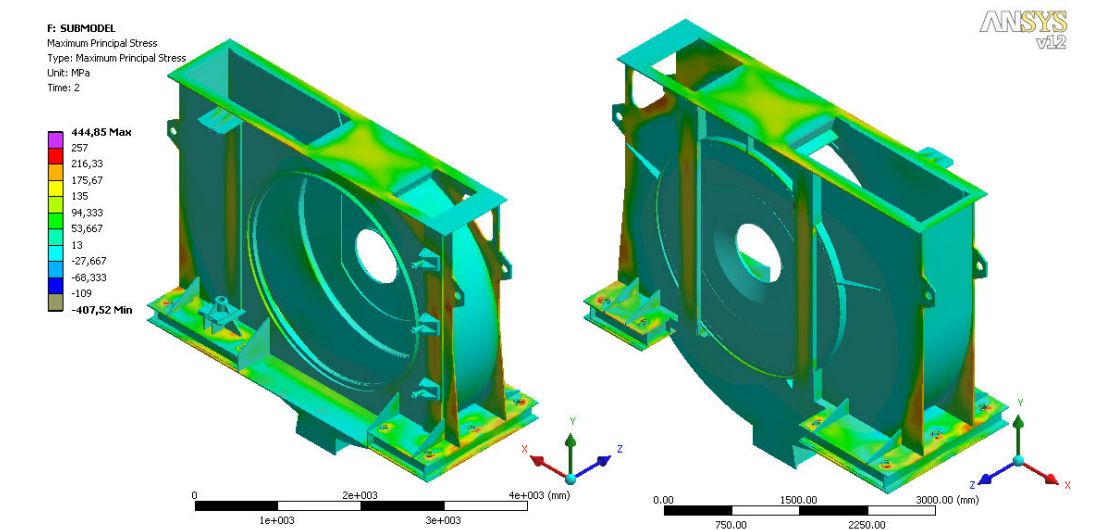
Obr.48 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 2



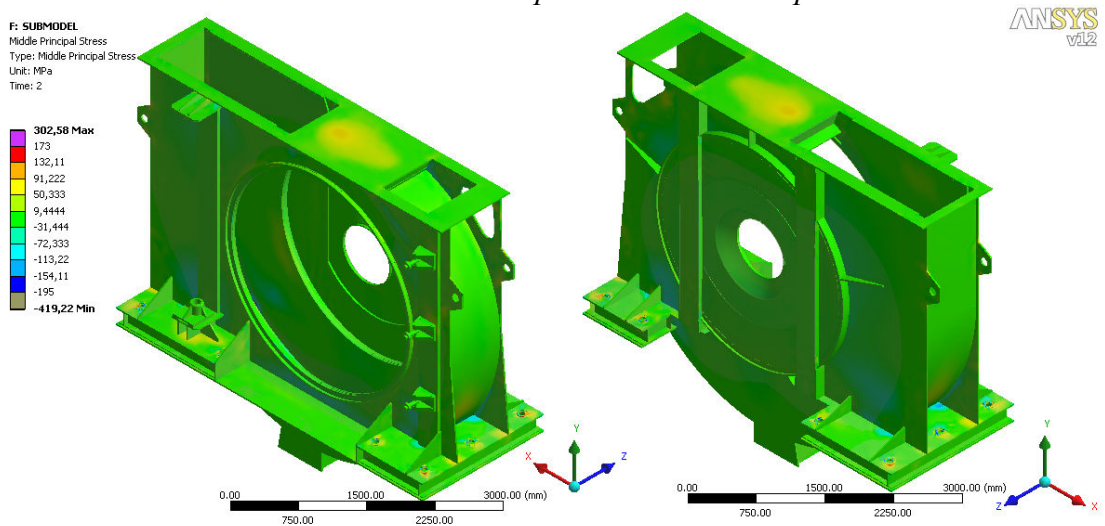
Obr.49 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,01



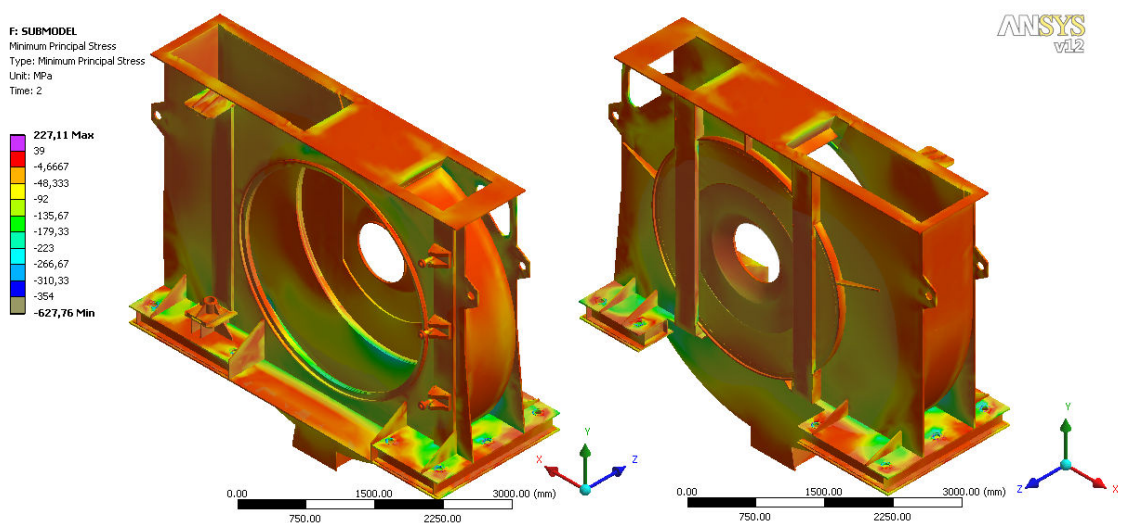
Obr.50 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,05



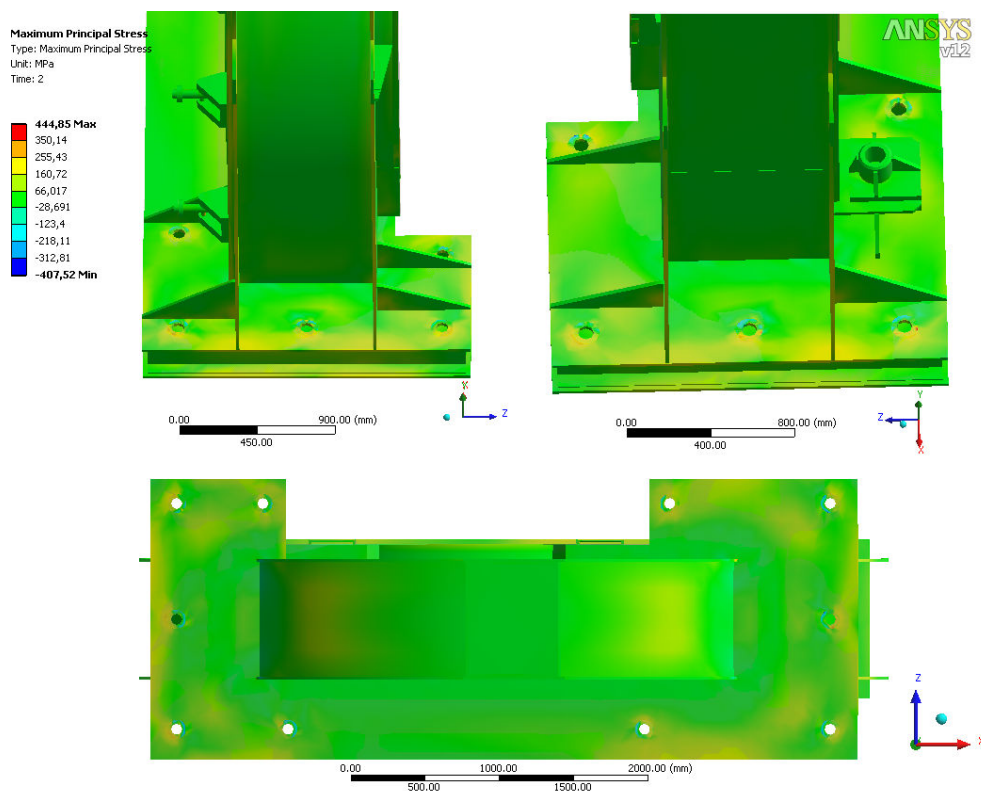
Obr.51 Rozložení prvního hlavního napětí



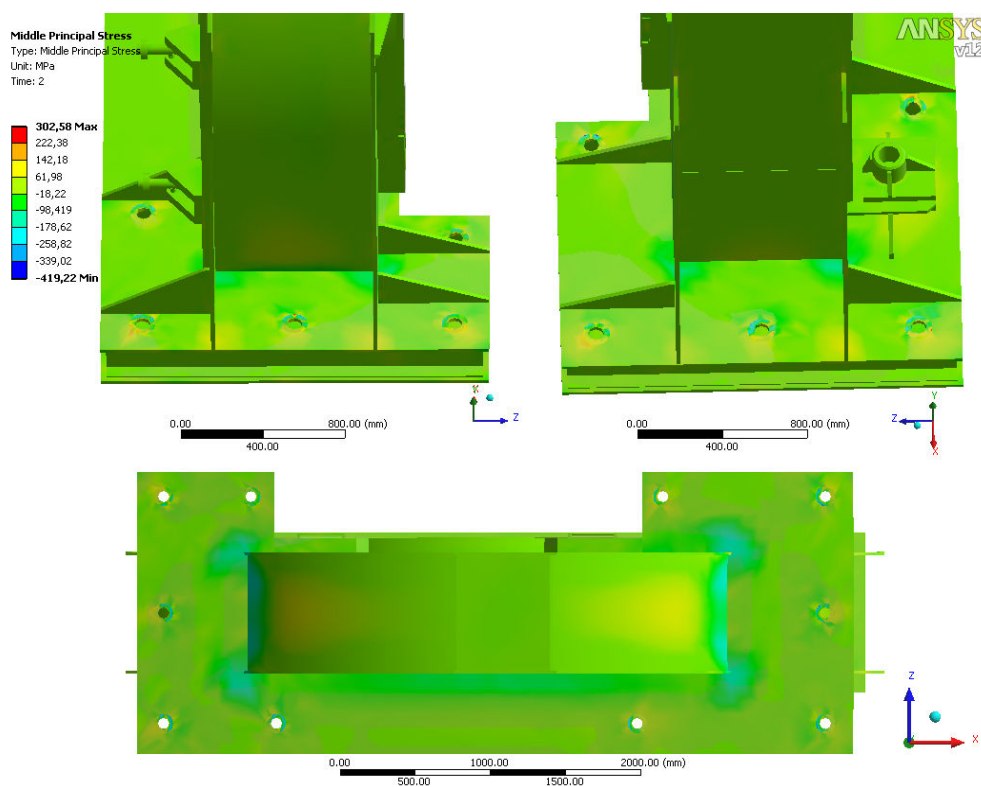
Obr.52 Rozložení druhého hlavního napětí



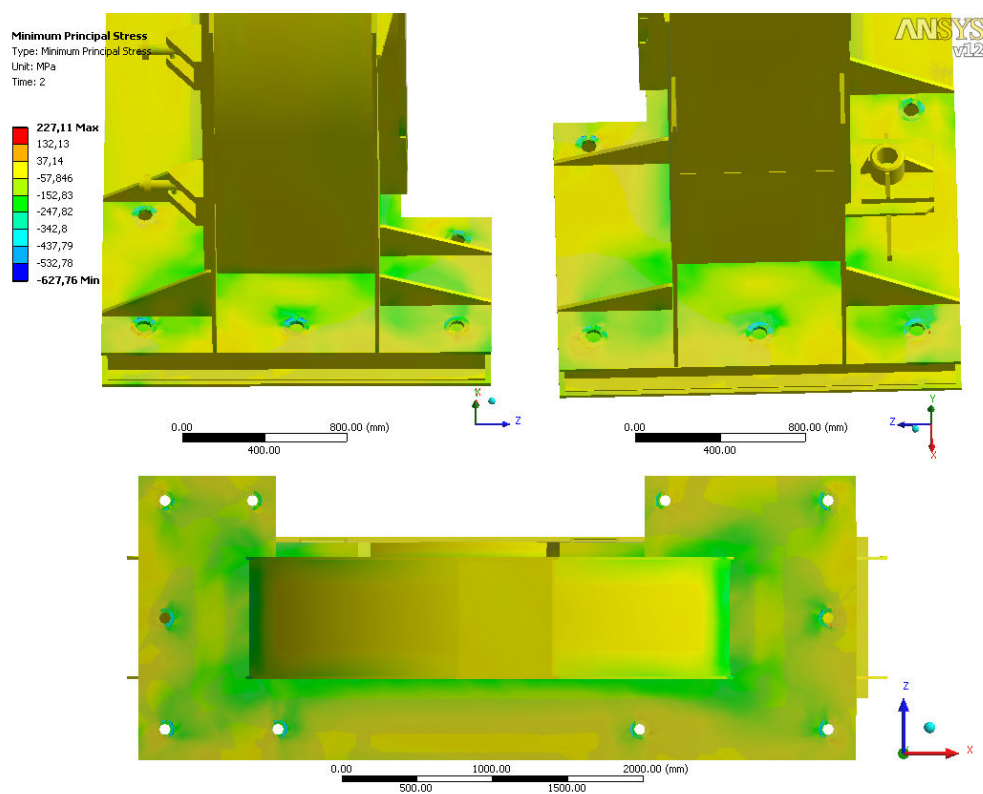
Obr.53 Rozložení třetího hlavního napětí



Obr.54 Rozložení prvního hlavního napětí – detail patek a dolní části skříně mlýna



Obr.55 Rozložení druhého hlavního napětí – detail patek a dolní části skříně mlýna



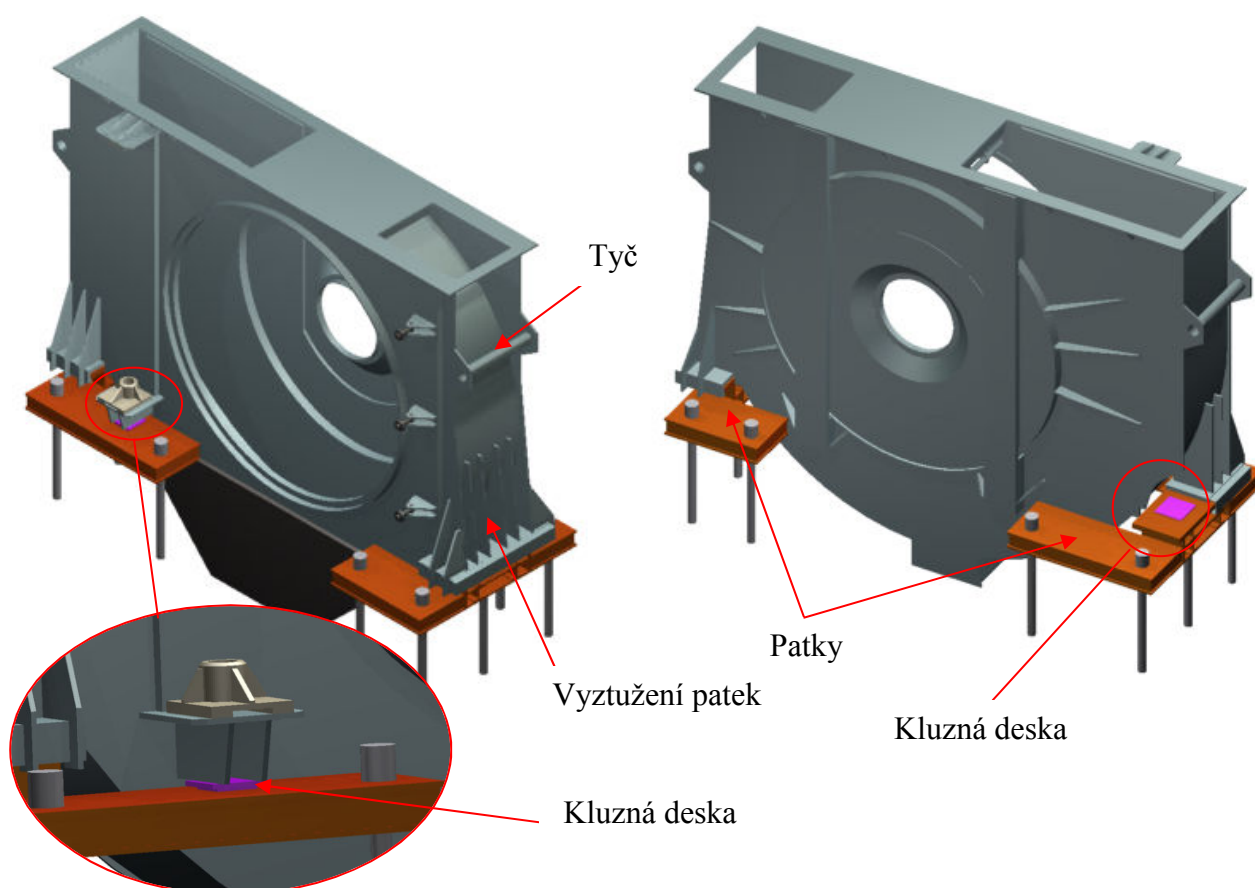
Obr.56 Rozložení třetího hlavního napětí – detail patek a dolní části skříně mlýna

4. KONSTRUKČNÍ VARIANTA B

4.1. Geometrický model

Při tvorbě geometrického modelu konstrukční varianty B bylo možno vycházet z modelu varianty A, kdy byl zachován třídič a vrata. Zaměněna byla skříň mlýna a asfaltové podloží, u nichž byly zachovány základní charakteristické rozměry (výška, šířka, hloubka).

Nově jsou provedeny patky, které jsou vyztuženy vyšším počtem válcovaných profilů a žeber oproti původní variantě. Skříň je provedena jako samostatný celek, volně položen na patkách. Ty jsou uloženy na betonovém podloží a ukotveny sadou kotevních prvků. Pohyb v horizontální rovině ($x-y$) je umožněn sadou kluzných desek, skládajících se z ocelových plechů, mezi nimiž je tenká vrstva teflonu. Umístěny jsou vždy po dvou na každé straně. Aby byly silové účinky působící na dolní pant přenášeny do základů a zároveň byl umožněn volný posuv skříně vůči patkám, je pod pantem umístěna další kluzná deska. Na stranu převodovky byla přidána žebra. Čelní a týlní stranu spojují dvě tyče, využívající montážní otvory.



Obr.57 Nově navrhovaná vyztužená skříň uložená na kluzných deskách

4.2. Materiálový model

Materiálový model konstrukční varianty B je shodný s materiálovým modelem varianty A. Teflonová vrstva nacházející se v kluzném uložení není modelována, pouze zohledněna vhodným koeficientem tření. V technické soustavě lze tedy definovat opět několik rozličných materiálů, jejichž fyzikální vlastnosti a závislosti na teplotě jsou uvedeny podrobně v kapitole 3.2 Materiálový model.

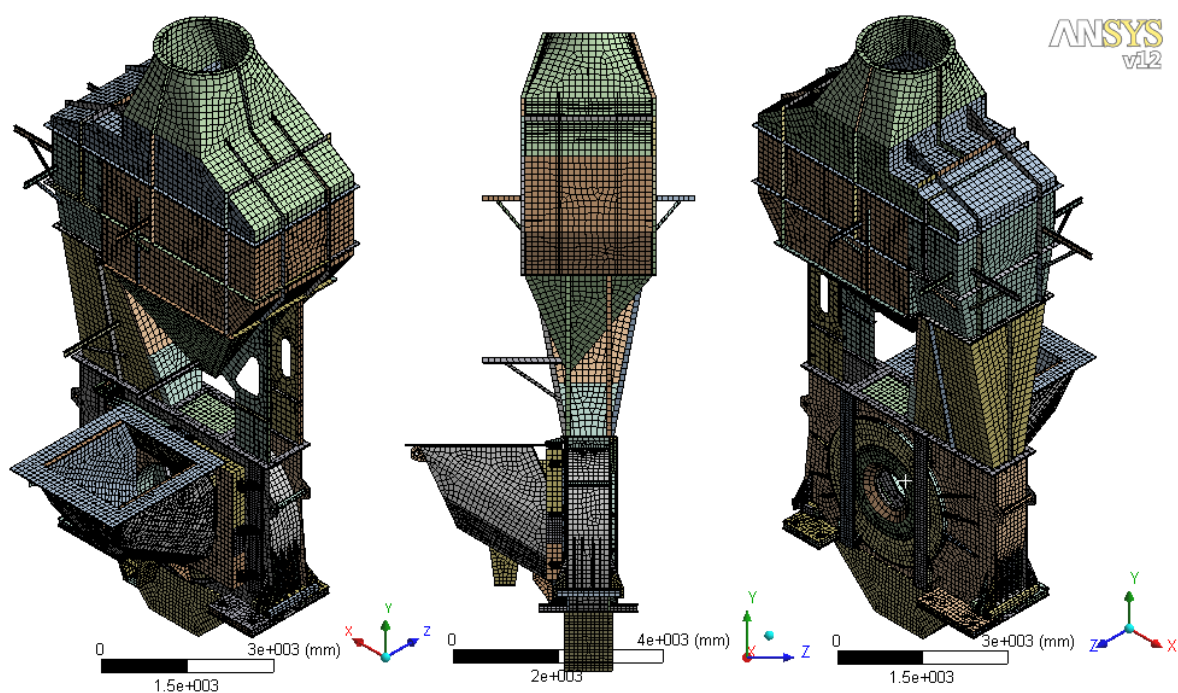
Jedná se o tyto materiály:

- Konstrukční ocel – skříň mlýna včetně patek, vrata, třídič
- Ušlechtilá ocel – vnitřní pancéřování skříně mlýna
- Žárobeton – vnitřní část vrat
- Asfalt – podloží skříně mlýna
- Pryž – těsnění mezi skříní a vraty

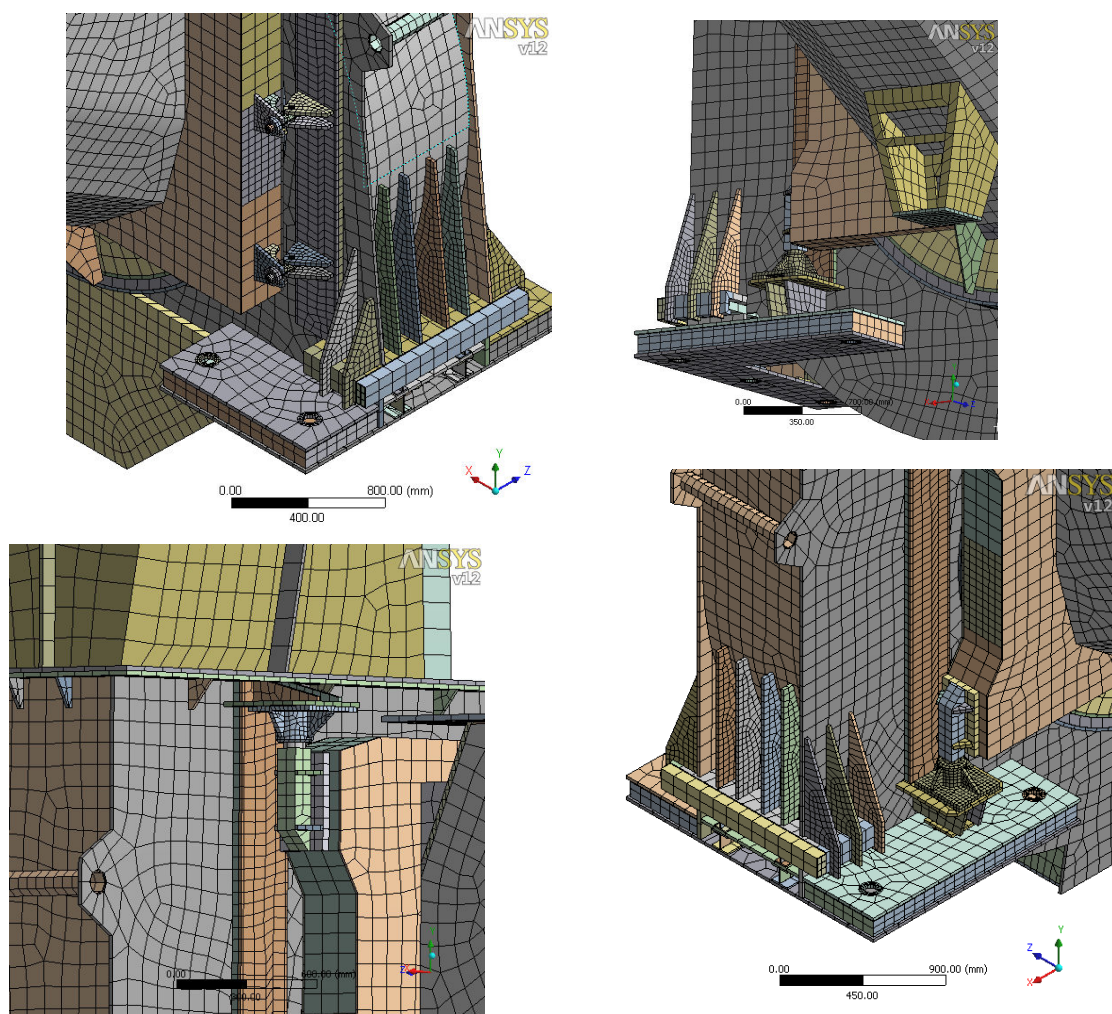
4.3. Diskretizace modelové soustavy

Geometrický model konstrukční varianty B byl diskretizován stejnými typy konečných prvků jako varianta A. Jejich podrobný výpis je uveden v kapitole 3.3 Diskretizace modelové soustavy. Hlavním typem konečného prvku byl izoparametrický prvek kombinující skořepinový a objemový prvek (SOLSH190).

Celkový počet prvků byl přibližně 67 500 a jim odpovídající počet uzlů se blížil 220 000.



Obr.58 Diskretizace modelové soustavy konstrukční varianty B



Obr.59 Detailní pohledy na přitlačné šrouby rám pojezdového kola, horní a dolní pant

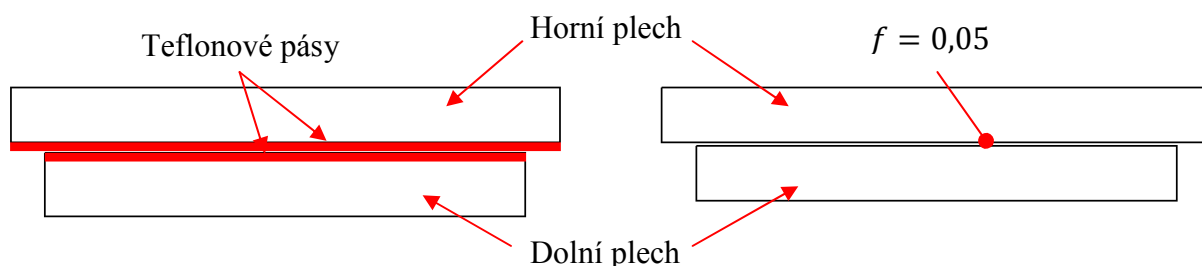
4.4. Modelování vybraných částí konstrukční varianty B

Obdobně jako v předchozí variantě, je v této kapitole popsáno jakým způsobem byly modelovány určité, specifické komponenty technické soustavy, významné z hlediska napjatosti a deformace, popř. jejího uložení v prostoru kotelny.

4.4.1. Kluzné desky

Kluzné desky jsou tvořeny dvěma ocelovými plechy, mezi nimiž jsou dva tenké pásy teflonu. Každý z těchto pásů je pevně spojen s ocelovým plechem.

Do výpočtového modelu jsou zahrnuty pouze ocelové plechy, jež jsou spojeny kontaktní vazbou umožňující vzájemné proklouznutí, popř. oddělení kontaktních ploch. Mezi kontaktními plochami je uvažováno tření s koeficientem $f = 0,05$ [–] dle [17].



Obr.60 Kluzné desky – skutečné provedení (vlevo) a modelové zjednodušení (vpravo)

4.4.2. Přehled vybraných modelovaných komponent konstrukční varianty B

Modelování vybraných komponent konstrukční varianty B je shodné s variantou A, navíc se zde objevuje modelování kluzných desek. Z tohoto důvodu je zde uveden pouze stručný přehled. Podrobně je tato problematika popsána v kapitole 3.4.9 Přehled vybraných modelovaných komponent konstrukční varianty A.

1. Radiální pancéřování

- Zahrnuto v podobě tíhové síly

2. Třídič

- Pevně spojen s horní částí skříně → vzniklé deformace přeneseny v podobě uzlových posuvů do detailního modelu
- Vybrané nosníky zatíženy tíhovou silou odpovídající hmotnosti technologických a servisních zařízení

3. Vrata

- Pevně spojena se skříní v pantech a přitlačných šroubech, volně spojena mezi pryžovým těsněním a skříní (tření není uvažováno) → vzniklé deformace přeneseny v podobě uzlových posuvů do detailního modelu
- Rámu pojezdového kola umožněn posuv v horizontální rovině a natočení kolem osy pantů

4. Asfaltové podloží

- Pevně spojeno se skříní
- Plochy dotýkající se betonového podloží vetknuty

5. Kotevní prvky

- Volně spojeny se skříní, tření není uvažováno, vetknuty do betonového podloží

6. Usazení na betonovém podloží

- Zamezeno posuvu patek skříně v horizontální rovině (směry x a z)
- Aplikováno pružné podloží s tuhostí $K = 1,47 \cdot 10^{10} [Nm^{-3}]$ (dle [5])

7. Vlastní tíha

- Respektována tíhovým zrychlením $g = 9,81 [ms^{-2}]$

8. Kluzné desky

- Uvažovány pouze ocelové plechy, koeficient tření mezi plochami $f = 0,05 [-]$

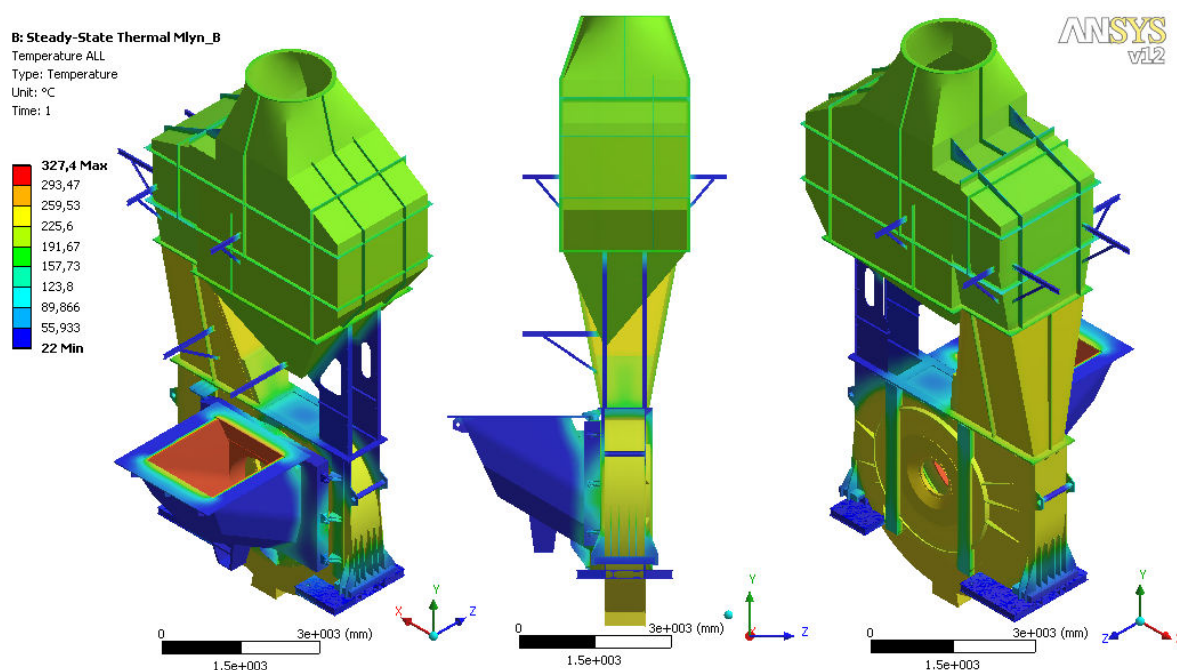
4.5. Teplotní analýza hrubé modelové soustavy

Obdobně jako v původní konstrukční variantě byly na vnitřní plochy vrat, skříně mlýna a třídiče zadány teploty v rozmezí 200°C až 300°C dle podkladů Ivitas a.s. [1] a [2]. Rozměry radiálního pancéřování jsou shodné s konstrukční variantou A, nepatrně se liší pouze jeho uchycení v horní části skříně. Tato odlišnost nemá vliv na rozložení teplot. Za těchto předpokladů je možno využít poznatků získaných v kapitole 3.5.1 Posouzení vlivu radiálního pancéřování, kde byly analyzovány teploty na vnitřních plochách spirálové části mlýnice a tyto teploty zadat do hrubé modelové soustavy.

Na vnější povrch byl zadán odvod tepla volnou konvekcí v podobě koeficientu přestupu tepla $\alpha = 10 [W m^{-2} K^{-1}]$ a sáláním v podobě emisivity ocelových plechů $\varepsilon = 0,7 [-]$ (dle [1], [7] a [15]). Referenční teplotou okolního vzduchu je 22°C. Výjimku tvořily vnější plochy asfaltového podloží a spodní plocha patek, kde se uvažuje dokonalá izolace betonovým podložím, a tudíž nulový odvod tepla.

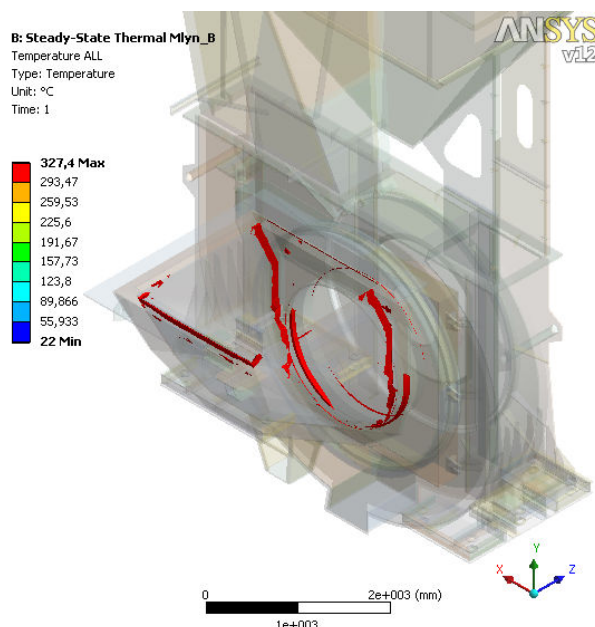
Cílem této analýzy je získat rozložení teplotních polí, která budou aplikována do strukturální analýzy a budou tvořit podstatnou část zatížení dané soustavy.

4.5.1. Rozložení teplot hrubé modelové soustavy



Obr.61 Rozložení teplot hrubé modelové soustavy

Stejně jako u hrubé modelové soustavy konstrukční varianty A se i v tomto případě vyskytly špičky teplot, nacházející se ve vratech na rozmezí žárobetonu a vnitřního ocelového pláště. Tento jev je opět připisován nepřesné diskretizaci. Obrázek 62 zobrazuje zmíněné špičky.



Obr.62 Teplotní špičky ve vratech mlýna

4.6. Strukturální analýza hrubé modelové soustavy

Teplotní pole získaná z předchozí analýzy, respektující zatížení teplotami, bylo doplněno zatížením od vlastní hmotnosti soustavy, zatížením od hmotnosti radiálního pancéřování a zatížením od hmotnosti plošin a klapek v třidiči. Jednotlivé zatěžující prvky jsou popsány v kapitolách 3.4.1. Radiální pancéřování, 3.4.3 Přídavná hmotnost třidiče a 3.4.8. Vlastní tíha technické soustavy.

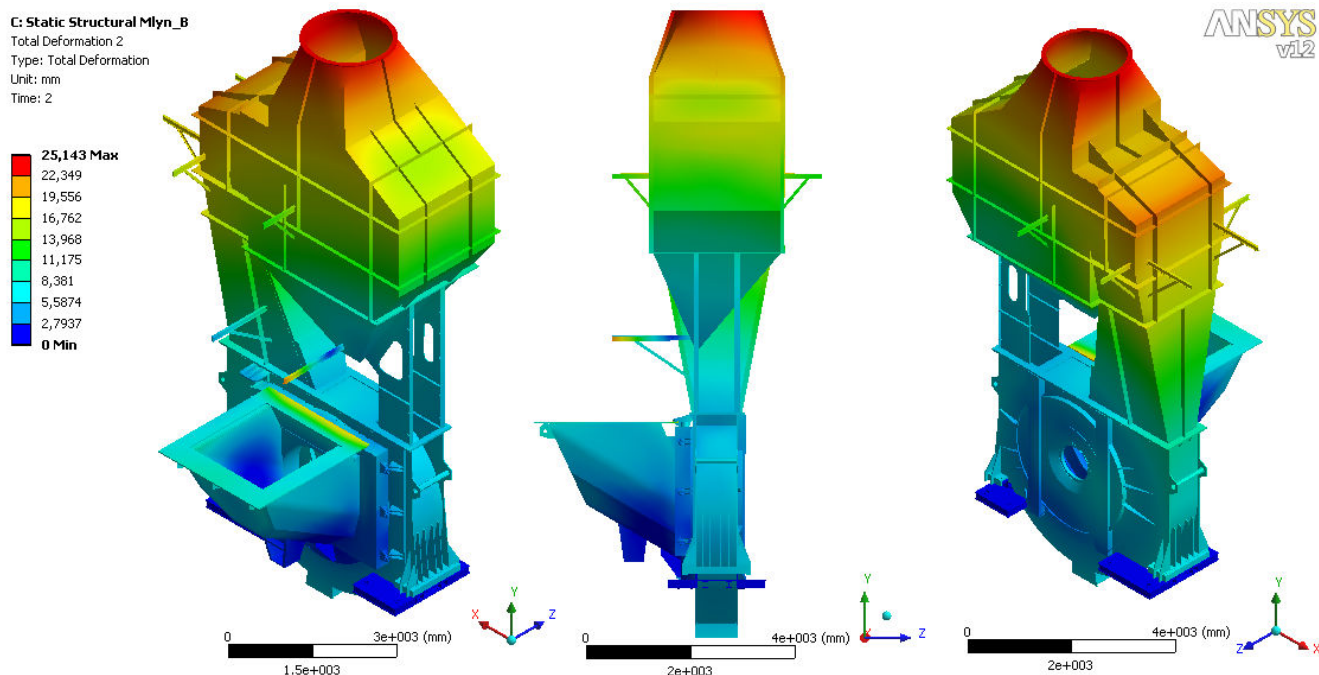
4.6.1. Deformační analýza

Na obrázku 63 jsou vyobrazeny celkové posuvy technické soustavy. K maximálním posuvům dochází v horní části třidiče, téměř 25,2 mm.

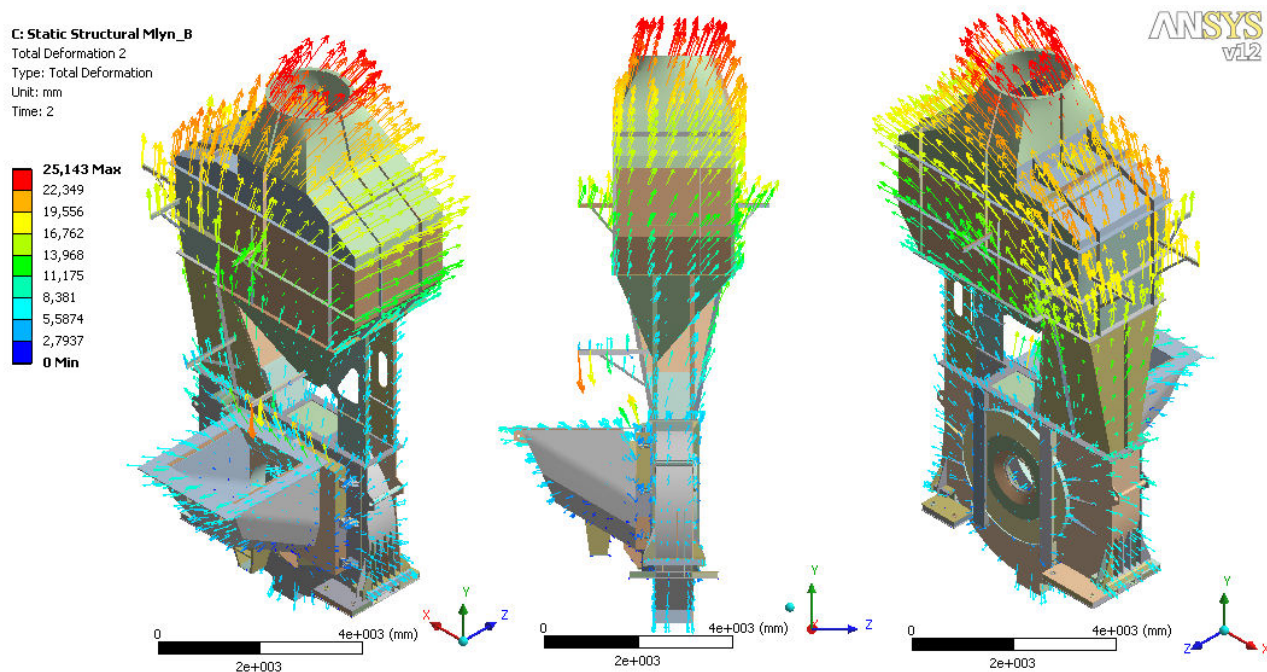
Z obrázku 64, zobrazující celkové posuvy vektorově, vyplývá, že obdobě jako v předchozí variantě se třidič deformuje převážně v kladném smyslu osy y, zatímco skříň v kladném i záporném smyslu osy x.

Na obrázcích 65, 66 a 67 jsou vykresleny posuvy v jednotlivých směrech.

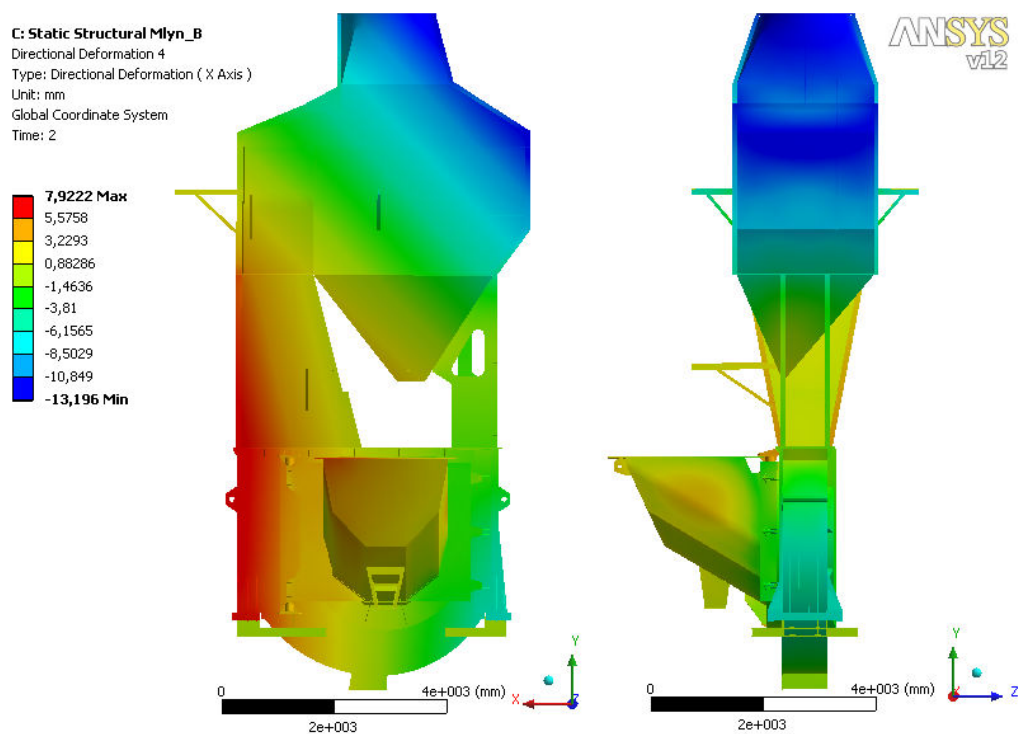
Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



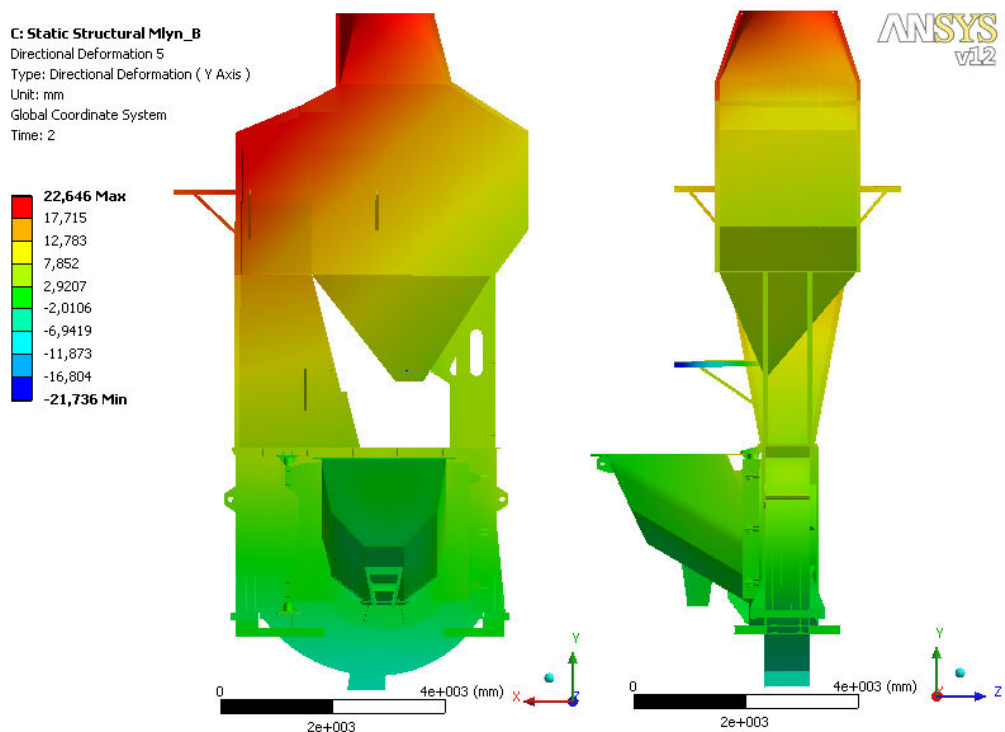
Obr.63 Celkové posuvy



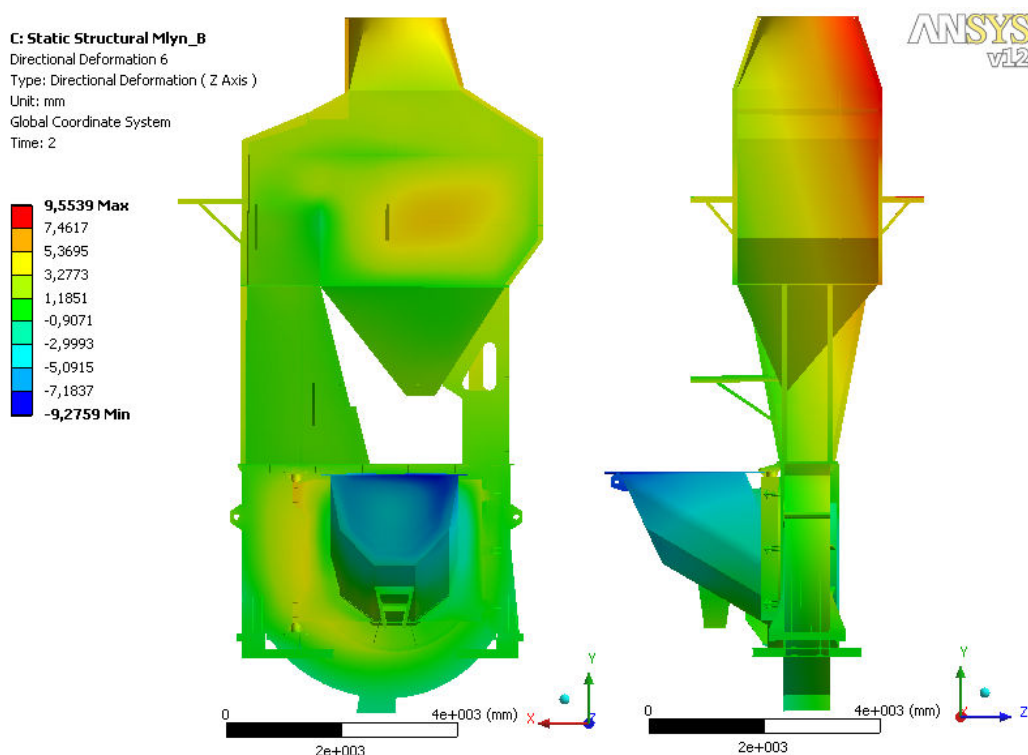
Obr.64 Celkové deformace – vektorově



Obr.65 Posuvy ve směru x



Obr.66 Posuvy ve směru y



Obr.67 Posuvy ve směru z

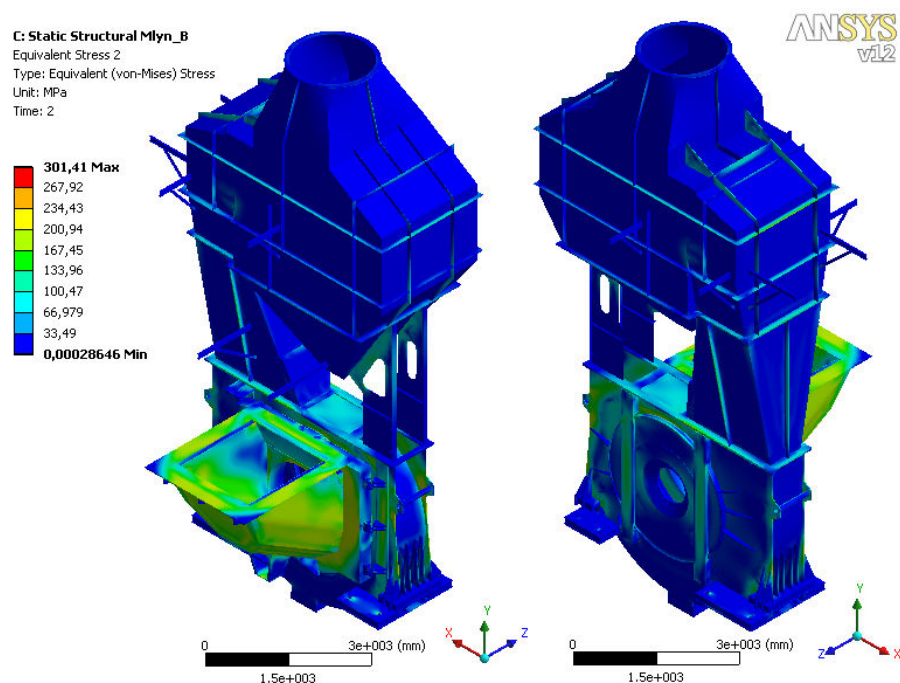
4.6.2. Napět'ová analýza

Rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMH uvedený na obrázcích 68 a 69 znázorňuje napjatost v hrubé modelové soustavě. Maximální napětí nepatrně přesahuje hodnotu 300 MPa . Na obrázcích 70 a 71 jsou znázorněny oblasti, kde redukované napětí přesahuje hodnotu 200 MPa , resp. 210 MPa . Oblasti s hodnotami napětí přesahující dané meze se nacházejí převážně ve vratech mlýna. Tyto špičky napětí se vyskytují ve velmi omezených úsecích a není jim potřeba přisuzovat vyššího významu.

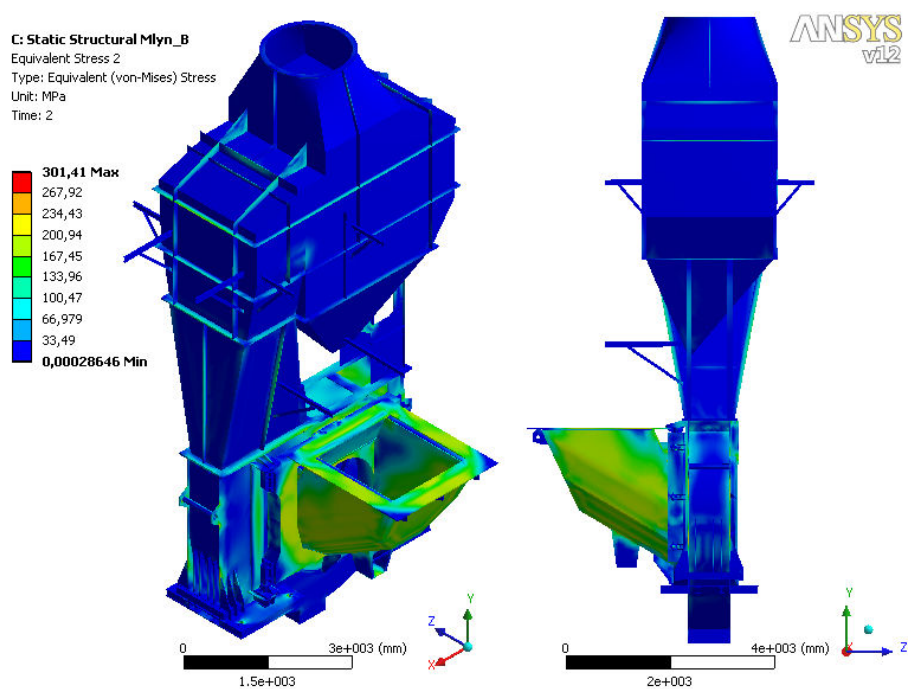
Obrázky 72 a 73 zobrazují poměrné plastické deformace s poměrem 0,00001 a 0,01. Zobrazeny jsou oblasti s plastickou deformací rovnou, popř. větší než je daný poměr.

Obdobně jako ve variantě A se vyskytují v důsledku velkého teplotního spádu vysoké hodnoty redukovaného napětí dle HMH ve vratech mlýna. Tato část modelové soustavy je shodná v obou variantách. Výsledné hodnoty redukovaného napětí jsou rovněž shodné, liší se pouze nepatrně v důsledku rozličné tuhosti skříně mlýna. Tyto odlišnosti jsou zanedbatelné a

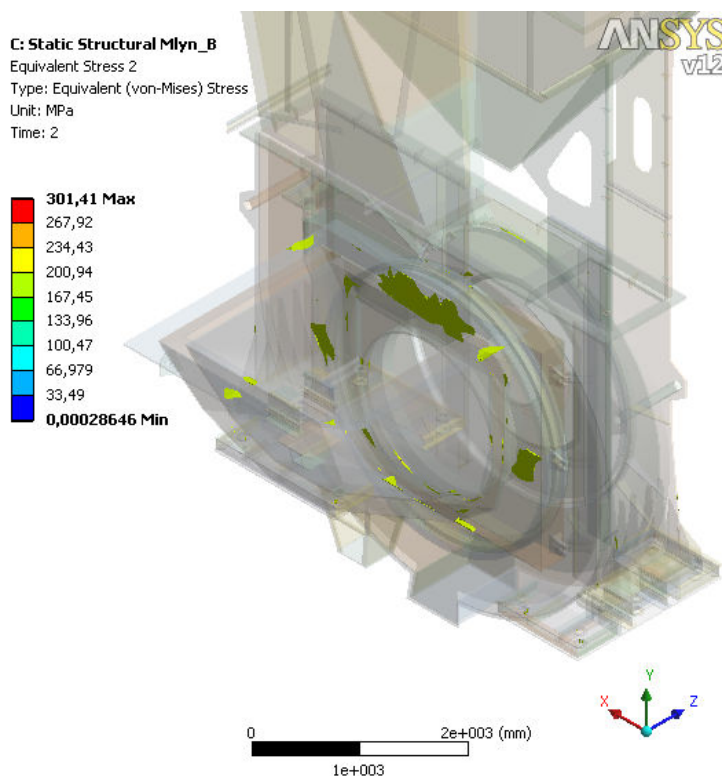
tato kapitola se jimi nezabývá, problematika je podrobněji popsána v kapitole 3.6.2 Napěťová
analýza a znázorněna na obrázcích 37 a 38.



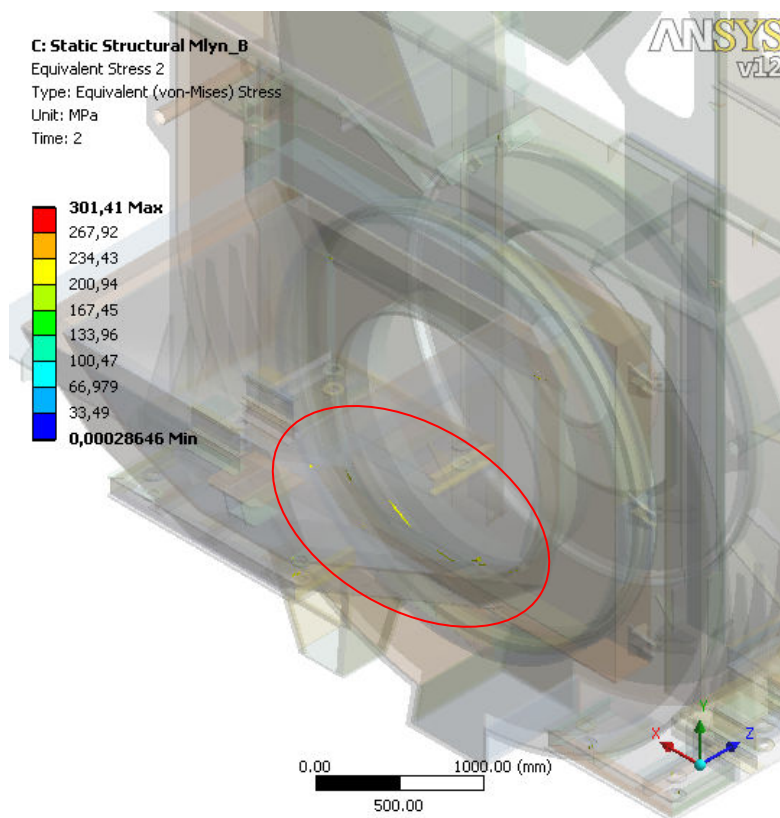
Obr.68 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 1



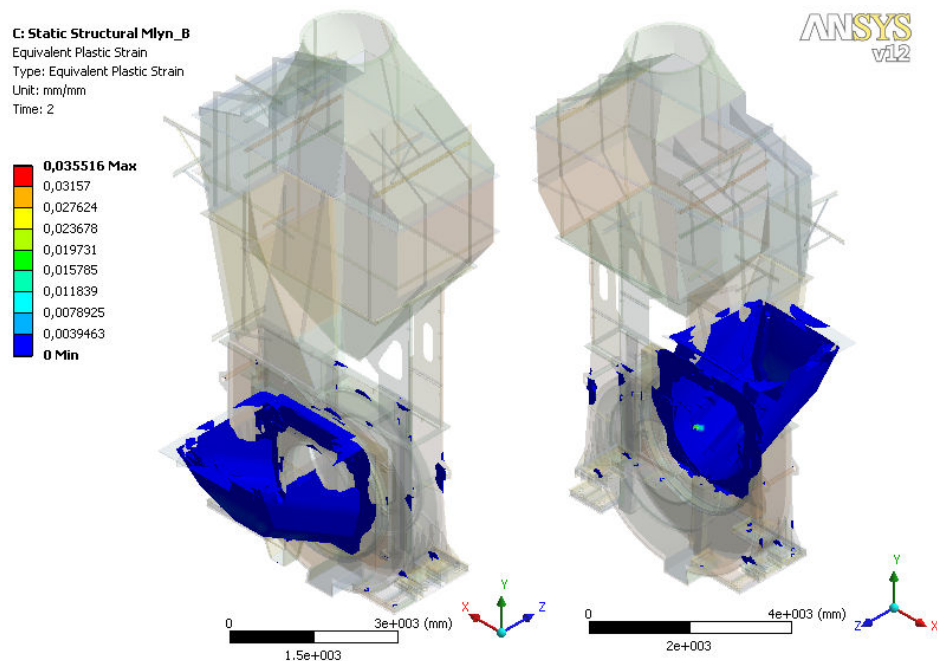
Obr.69 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 2



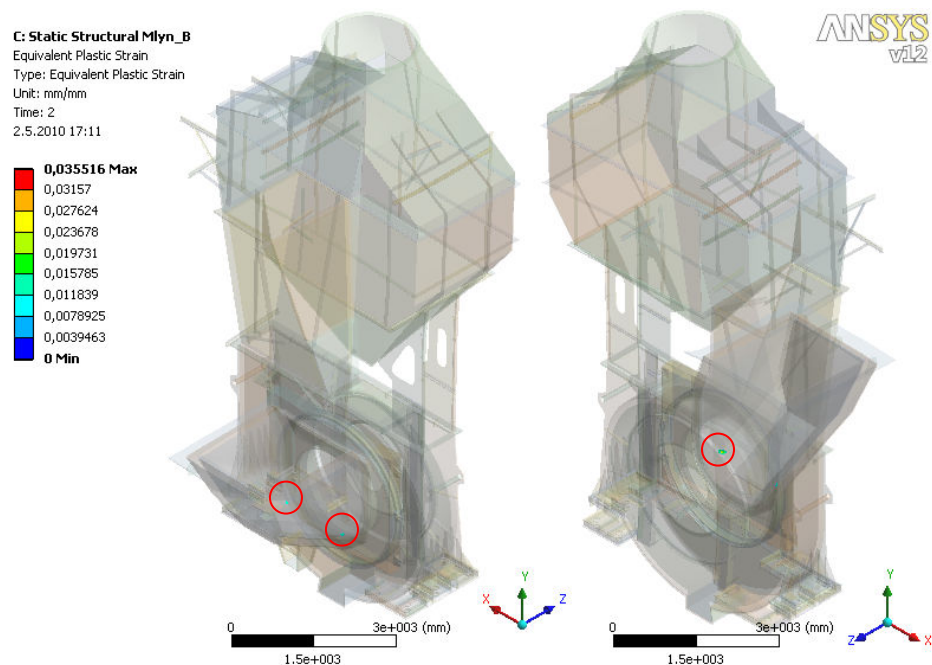
Obr.70 Redukované napětí – oblasti s napětím vyšším než 200 MPa



Obr.71 Redukované napětí – oblasti s napětím vyšším než 210 MPa



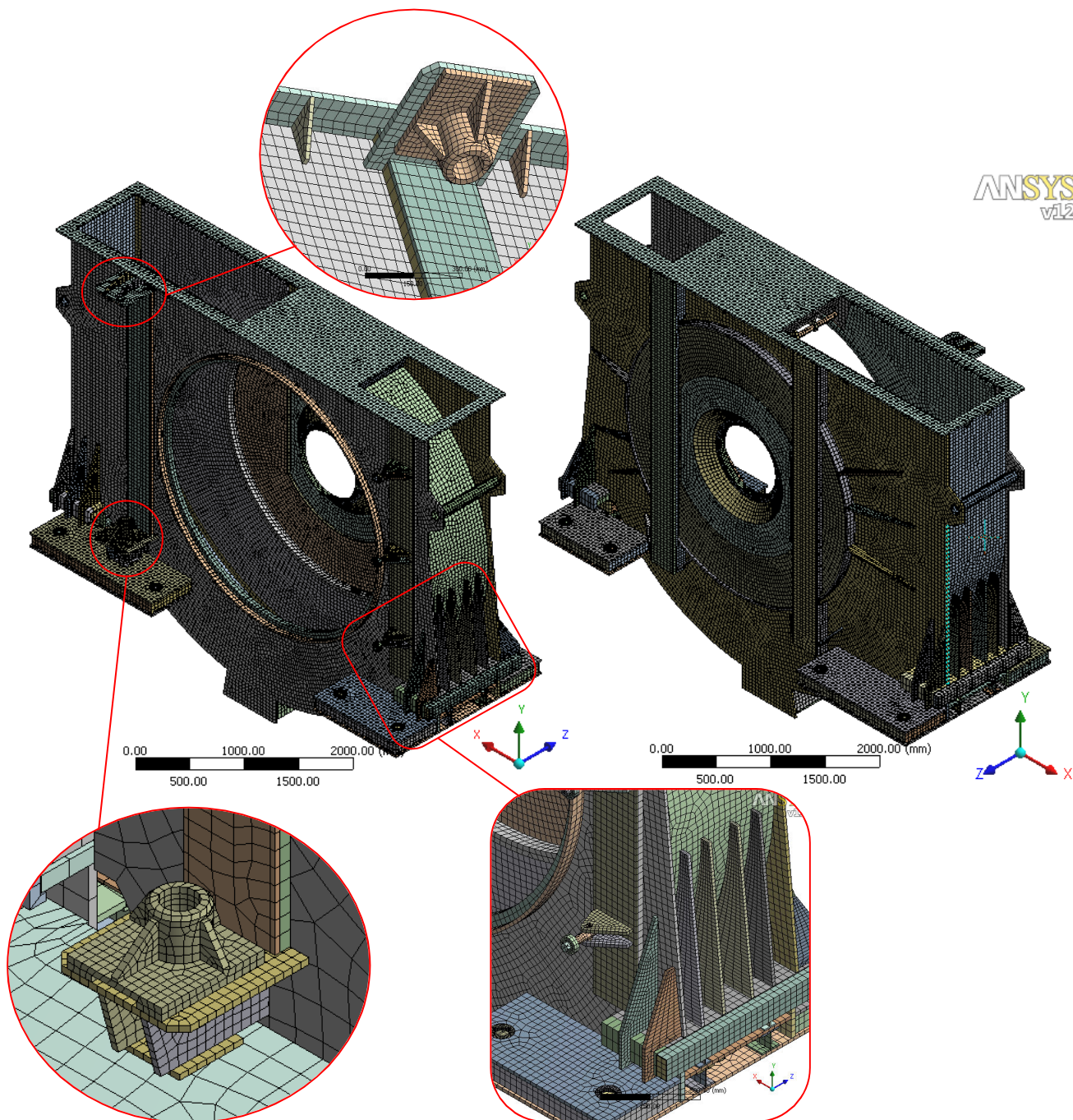
Obr.72 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,00001



Obr.73 Plastická deformace – zobrazeny oblasti s deformací větší než 0,01

4.7. Detailní model

Shodně s variantou A i v tomto případě má detailní model shodou geometrii a materiálový model s hrubou modelovou soustavou. Je diskretizován mnohem větším počtem prvků, přičemž byl kladen důraz na oblasti, odkud jsou přenášeny uzlové posuvy a uzlové teploty z hrubé modelové soustavy (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní) a také na oblasti patek.

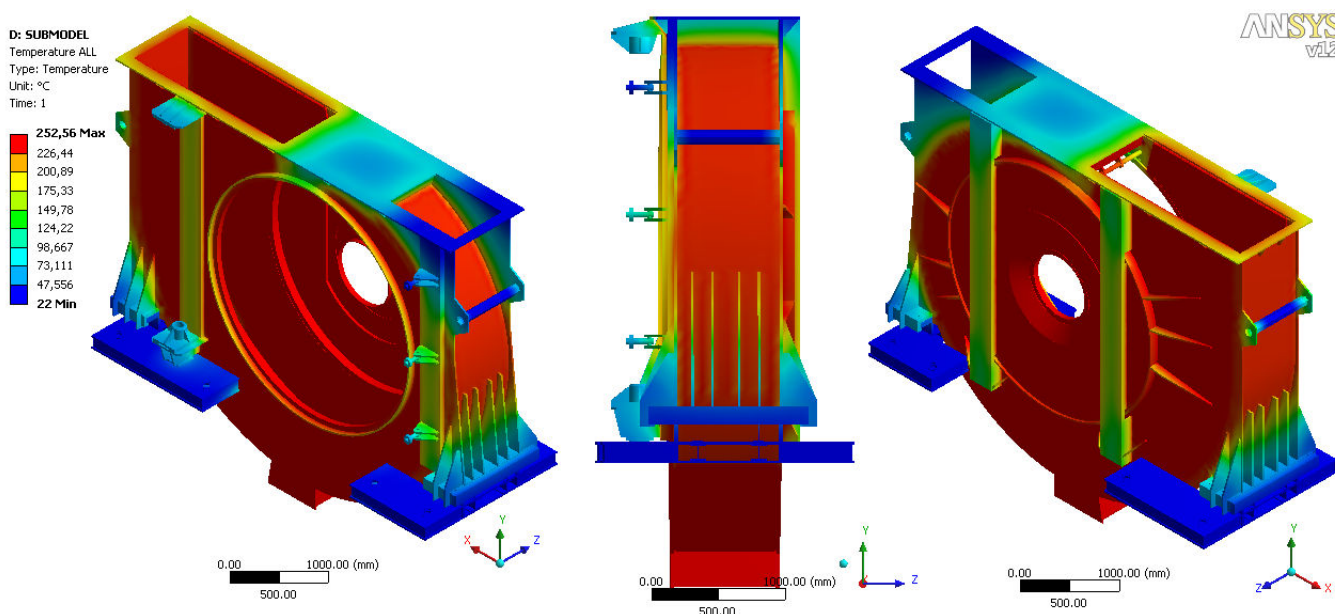


Obr.74 Diskretizace detailního modelu

4.7.1. Teplotní analýza detailní modelové soustavy

Shodně s konstrukční variantou A bylo nutné provést teplotní analýzu i u detailního modelu konstrukční varianty B. Byly přeneseny uzlové teploty vybraných ploch (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní), veškeré další vstupy pro výpočet jsou shodné s hrubou modelovou soustavou a jsou uvedeny v kapitole 4.5 Teplotní analýza hrubé modelové soustavy. Jedná se o:

- Vnitřní povrchové teploty ve vratech, skříní a třídiči v rozsahu 200°C až 300°C (zde uplatněny pouze teploty týkající se skříně mlýna)
- Odvod tepla volnou konvekcí a sáláním do okolního vzduchu



Obr.75 Rozložení teplot detailní modelové soustavy

4.7.2. Strukturální analýza detailní modelové soustavy

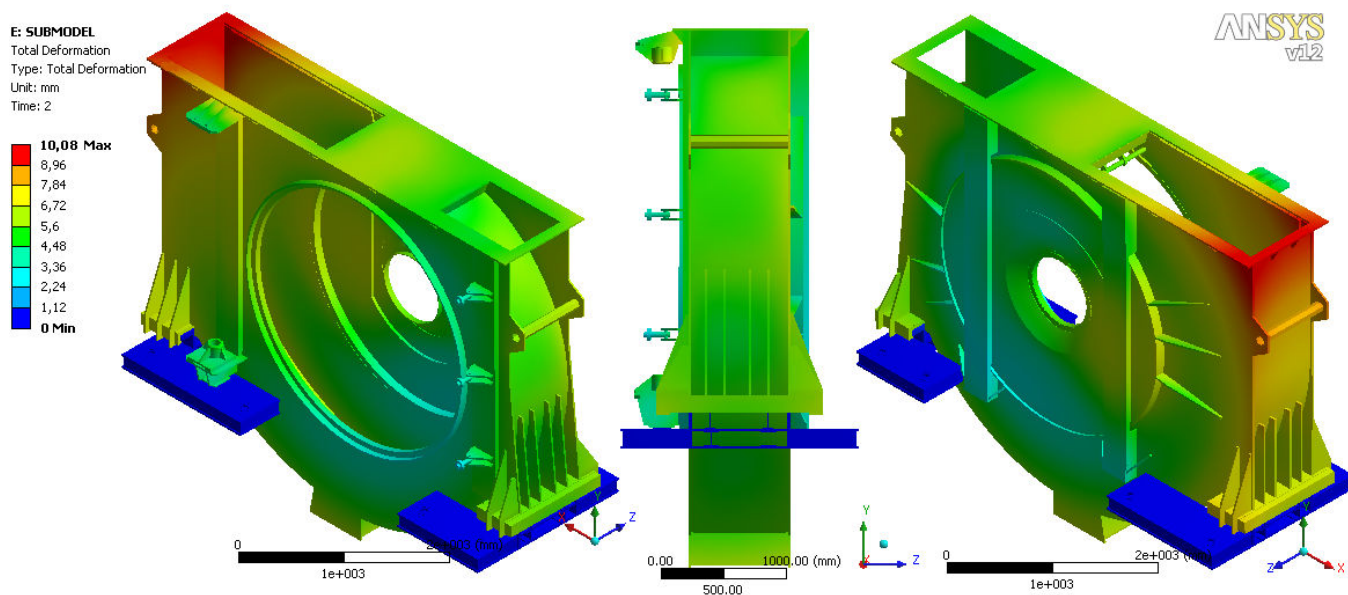
Zatížení při této analýze tvoří uzlové posuvy a uzlové teploty vybraných ploch (panty, horní plocha skříně mlýna, dosedací plocha mezi pryžovým těsněním a skříní), které jsou zde přeneseny z hrubé modelové soustavy, vlastní tíha respektována tíhovým zrychlením $g = 9,81 [ms^{-2}]$ a tíhová síla odpovídající radiálnímu pancéřování.

4.7.2.1. Deformační analýza

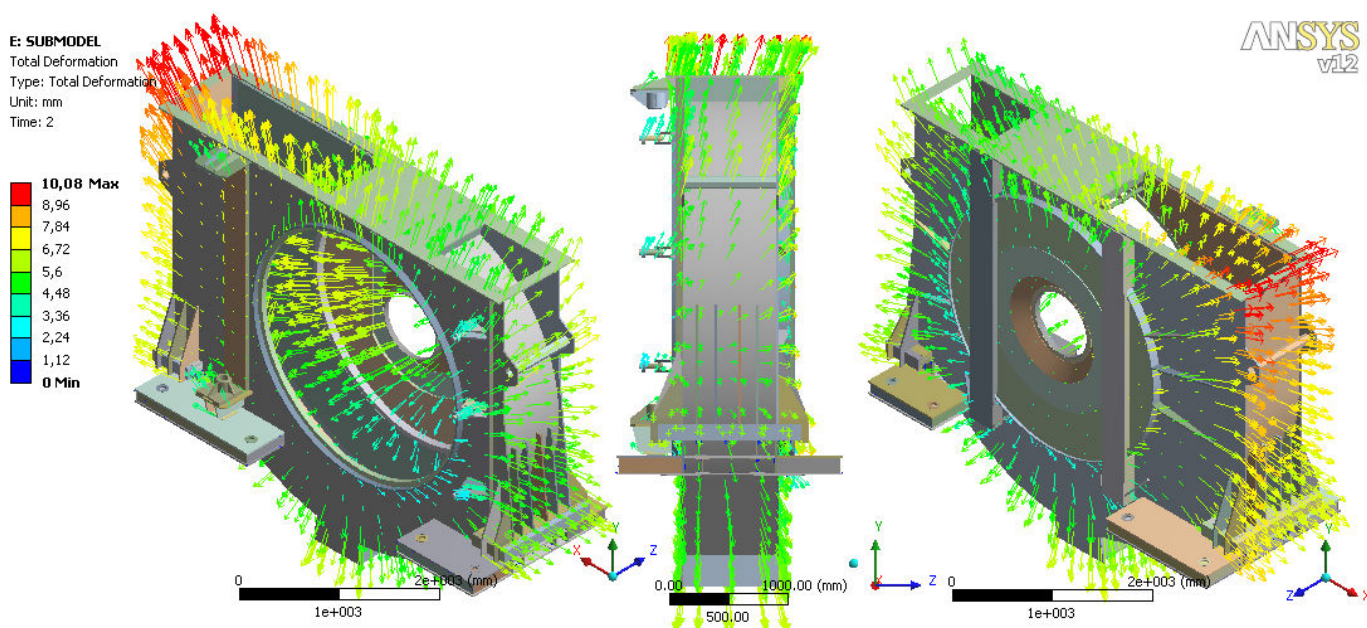
Největší hodnoty posuvů se nacházejí v horní části mlýnice (obr. 76 a 77) v okolí horního pantu. Na obrázcích 78, 79 a 80 jsou vykresleny posuvy v jednotlivých směrech. Roztahováním skříně ve směru osy x , dochází opět k propadu čelní a týlní strany. Při 10-ti násobném zvětšení celkových posuvů (obr. 81) vynikne rozdíl mezi posuvy skříně a posuvy patek, které jsou v tomto případě téměř nulové. Díky tomu, že je dolní pant přichycen pouze k tělesu skříně a na patce je volně položen přes kluzné uložení, dochází k deformaci pantu a k rozevření kluzných ploch (obr. 81). Tento jev je nepříznivý vzhledem k výrazné prašnosti prostředí, proto se doporučuje zmíněné uložení zapouzdřit a ochránit ho tak před vlivy okolního prostředí.

Další důkaz o rozevření kluzných ploch je podán na obrázku 82, kde je znázorněn status kontaktu. Vyplývá z něj, že se kluzné plochy od sebe oddělí a spojeny zůstanou pouze na omezené části kontaktní plochy v blízkosti skříně. Z obrázku je dále patrné, že se kontaktní plochy nepatrně zdeformují a silový přenos se koná přes plochy menší, než byly původně navrženy. Maximální posuvy kontaktních ploch dosahují $7,2\text{ mm}$ (obr. 83). Po prostudování celkových posuvů a posuvů kontaktních ploch a srovnání s výkresovou dokumentací lze konstatovat, že navrhované vůle mezi skříní a patkami jsou dostatečné a nedojde ke kontaktu v důsledku tepelné dilatace skříně.

Důsledkem nerovnoměrného zatížení kluzné desky pod dolním pantem vrat je provedena kontrola kontaktních tlaků (obr. 84). Z jejich rozložení vyplývá, že se v místě pod dolním pantem hodnoty blíží 5 MPa , což je hodnota bezpečná a nehrozí riziko rozdrcení teflonových desek, které mají maximální únosnost 10 MPa (dle [17]). Maximální hodnota se v levé patce blíží $13,6\text{ MPa}$. Jedná se o špičkovou hodnotu, která je především ovlivněna diskretizací kontinua. Přesto se doporučuje dané kluzné uložení upravit, a to zvětšením dimenze nebo jeho přesunutím dále od středu mlýnice (dále od osy x) a blíže k ose hřídele (osa z) (obr. 85).

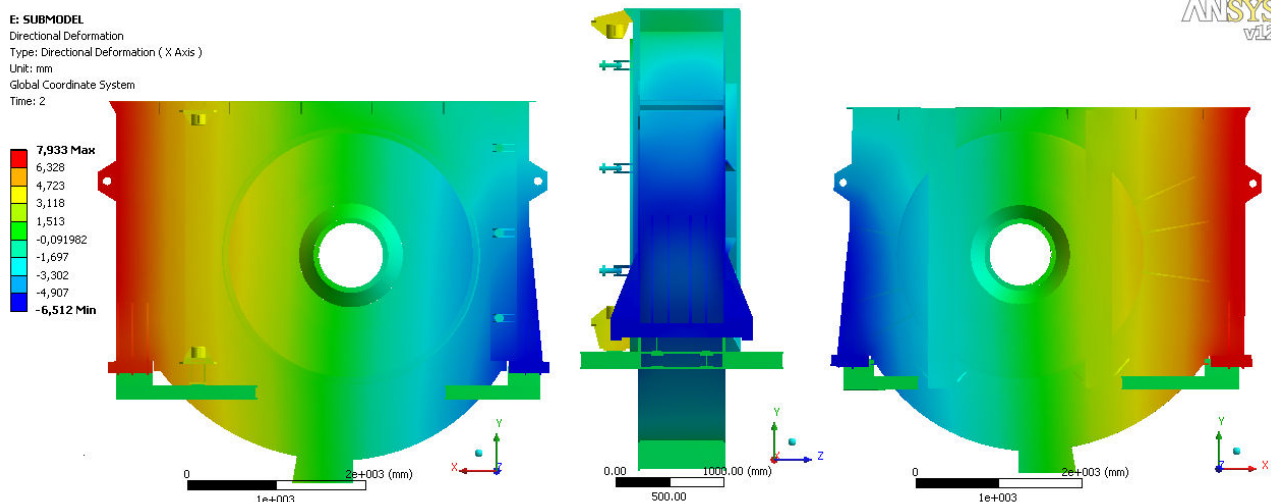


Obr.76 Celkové posuvy

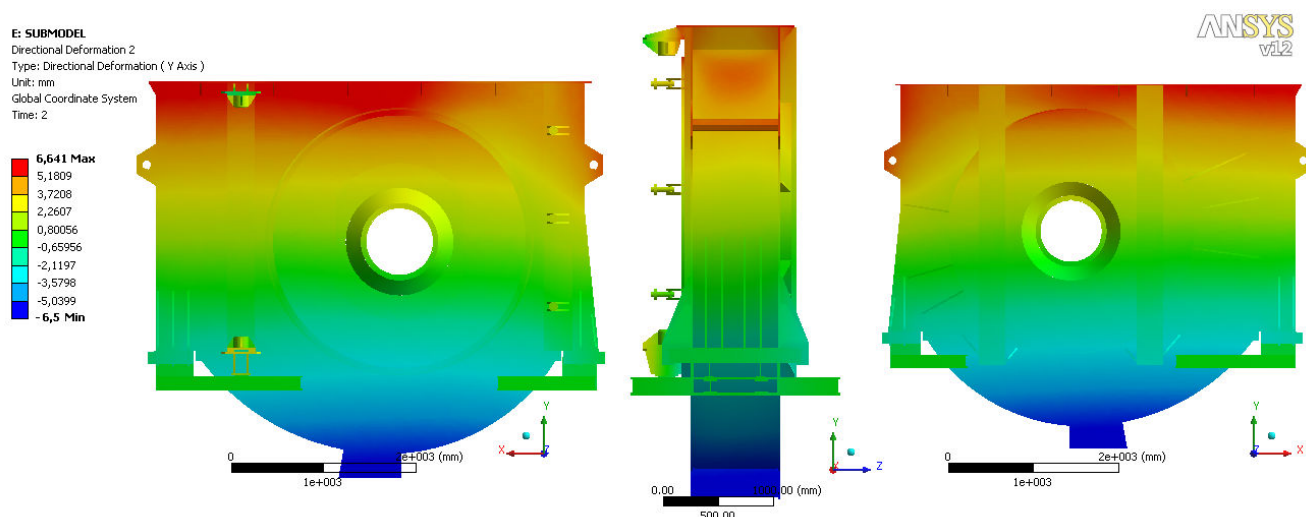


Obr.77 Celkové posuvy - vektorově

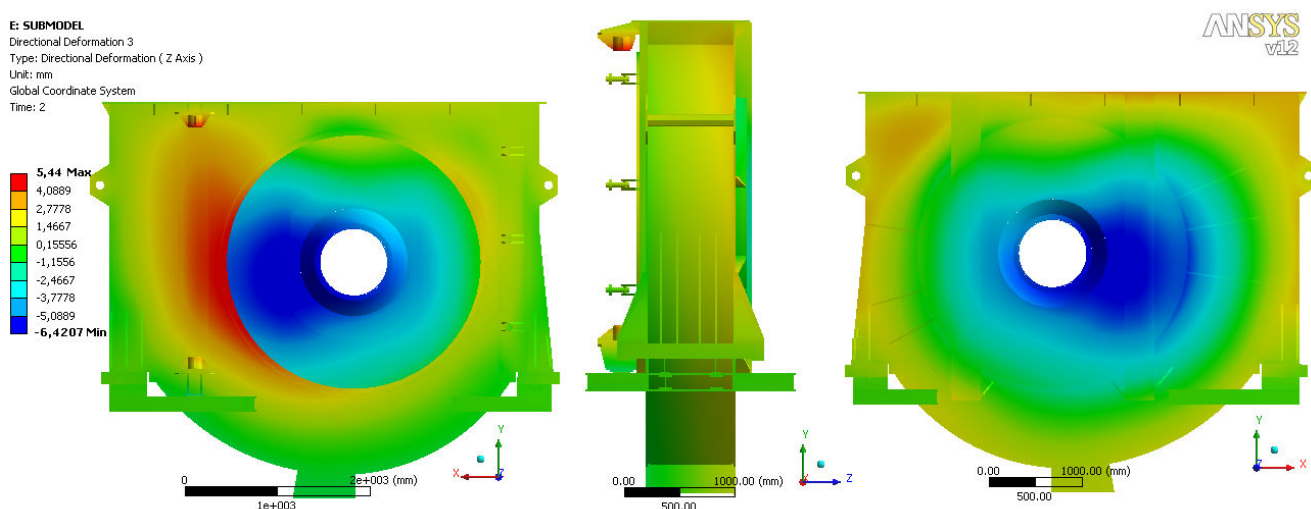
Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



Obr.78 Posuvy ve směru x



Obr.79 Posuvy ve směru y



Obr.80 Posuvy ve směru z

Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace

E: SUBMODEL

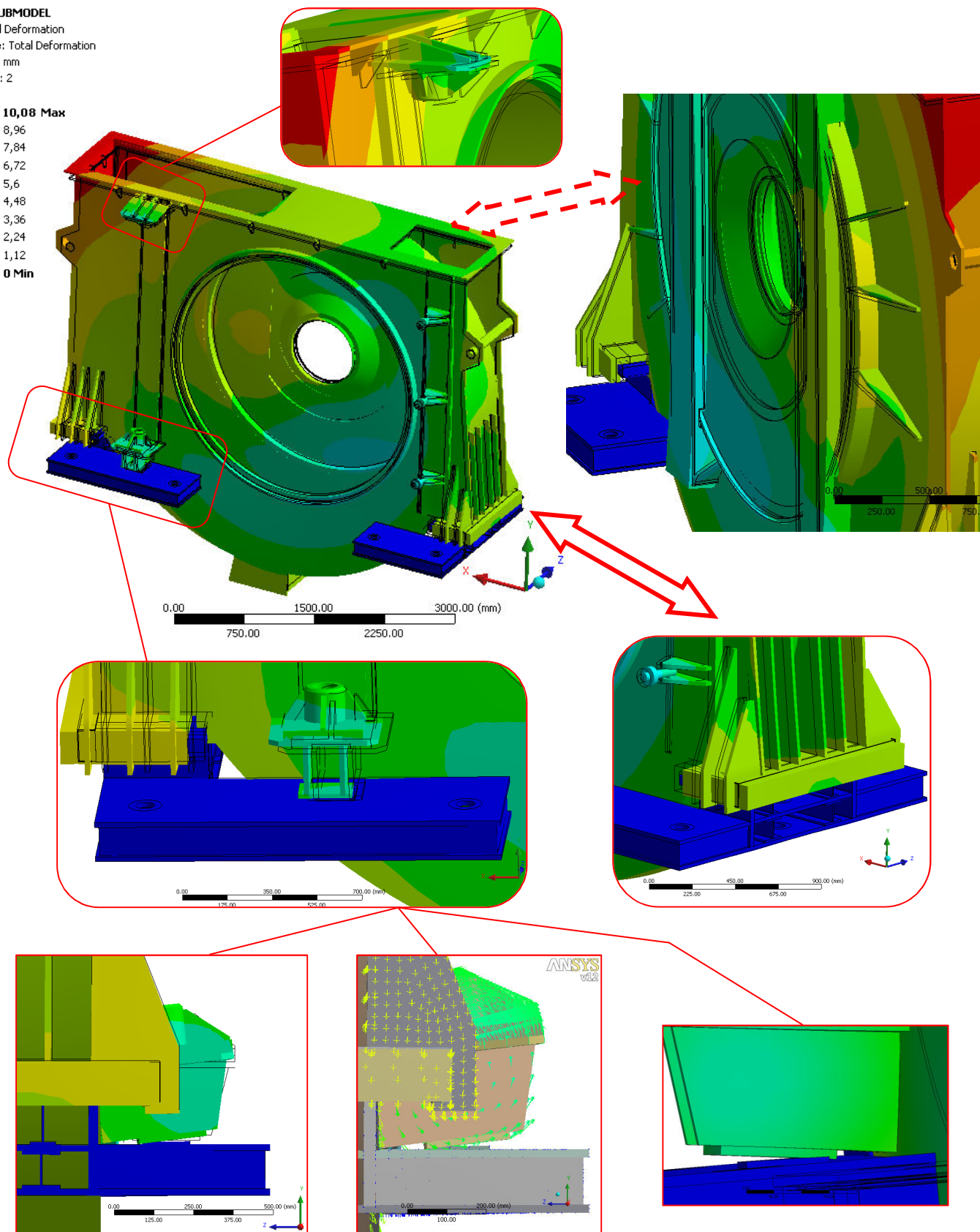
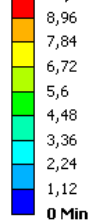
Total Deformation

Type: Total Deformation

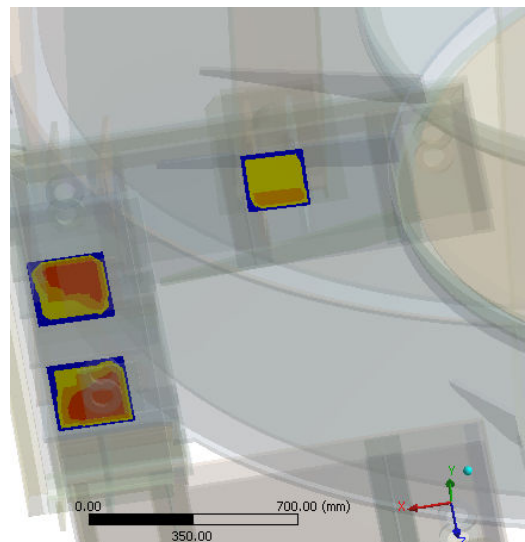
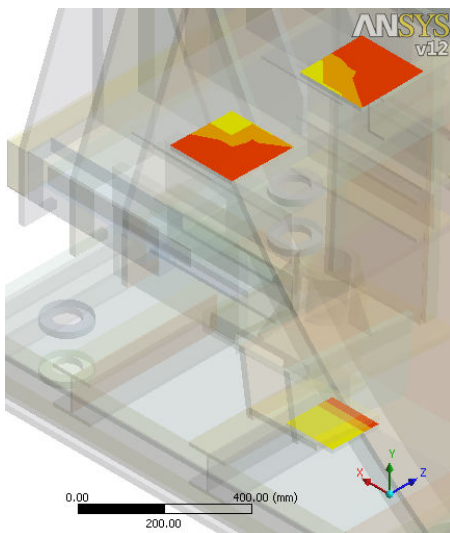
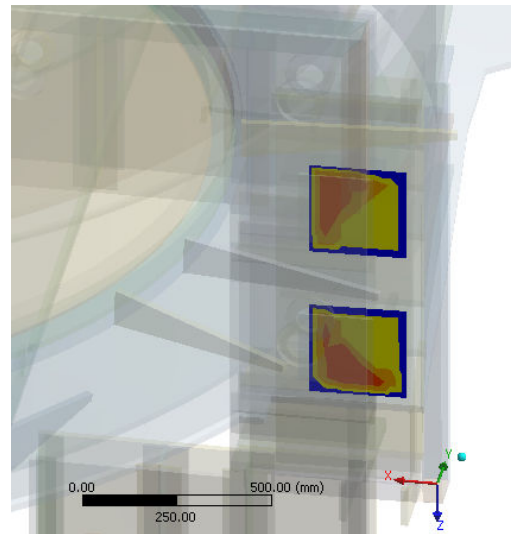
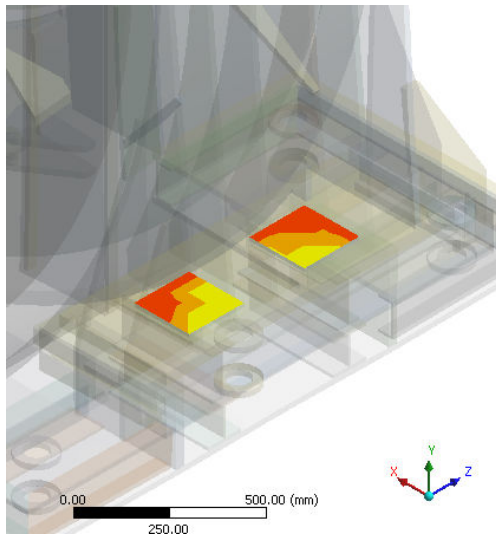
Unit: mm

Time: 2

10,08 Max



Obr.81 Celkové posuvy zobrazeny s 10-ti násobným zvětšením a s vykreslenými konturami nedeformované skříně mlýna; vektorové zobrazení posuvů dolního pantu



E: SUBMODEL

Status

Type: Status

Time: 2

Over Constrained

Far

Near

Sliding

Sticking

Legenda:

Far – daleko od kontaktu

Near – blízko kontaktu

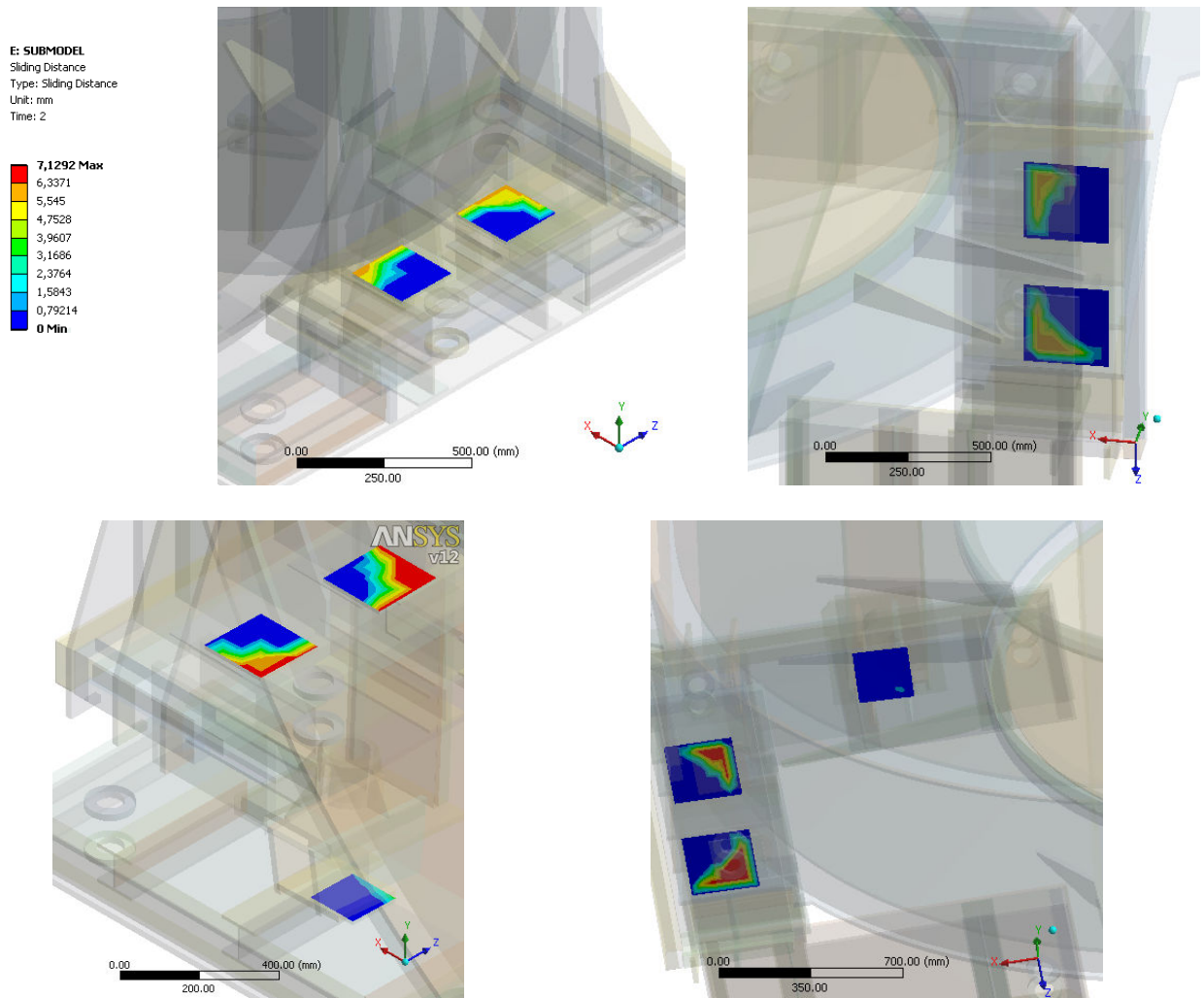
Sliding – prokluz kontaktu

Sticking – kontakt

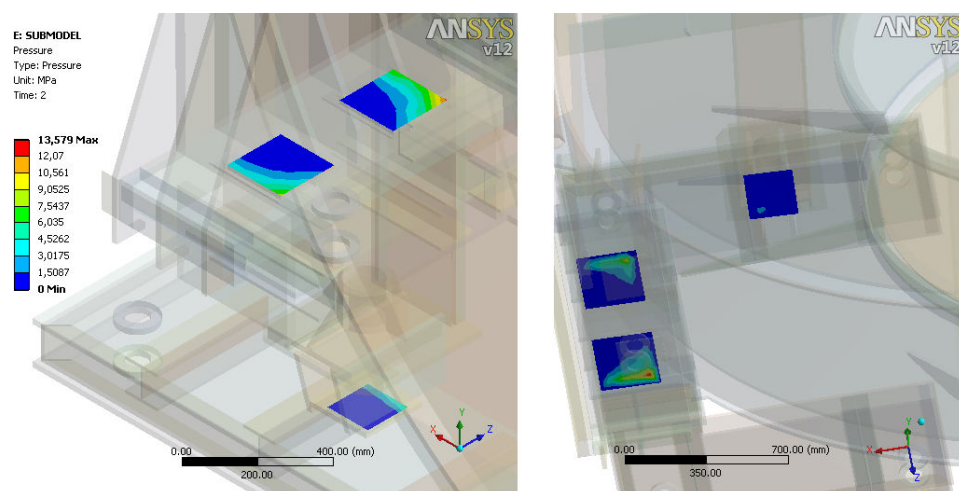
Over Constrained – přeuročený kontakt (oblast s výskytem matematických chyb)

*Obr.82 Status kontaktu – pravá (nahore) a levá (dole) patka, zobrazen status dolního i
horního kluzného tělesa*

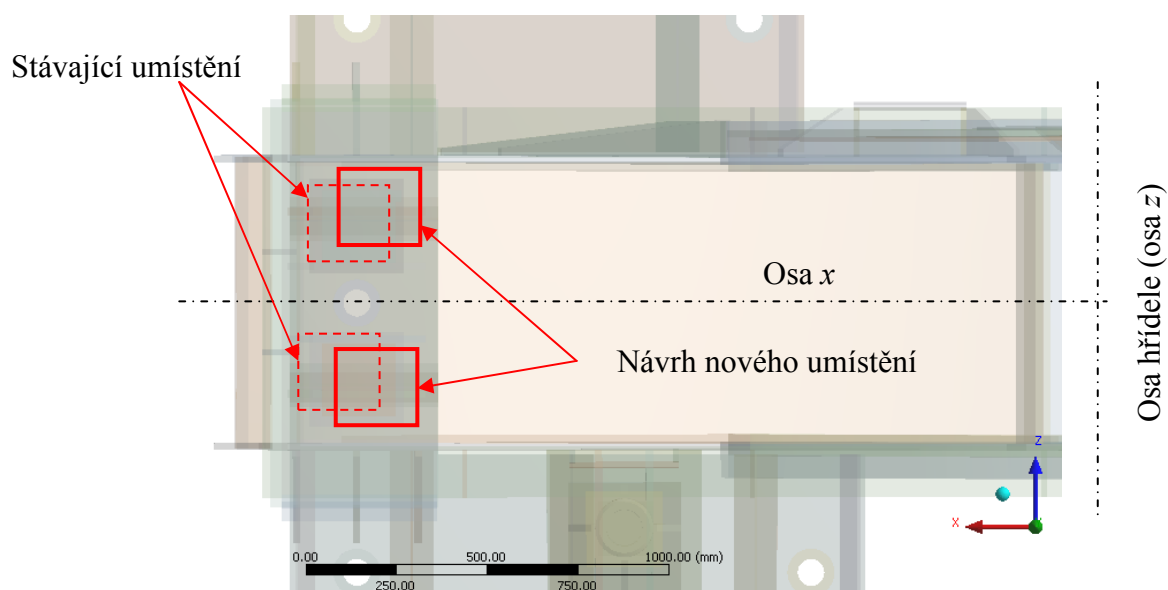
Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



Obr.83 Prokluz kontaktu - pravá (nahore) a levá (dole) patka, zobrazen prokluz dolního i horního kluzného tělesa



Obr.84 Kontaktní tlaky v levé patce, zobrazeny tlaky na dolním (vlevo) a horním (vpravo) kluzném tělese



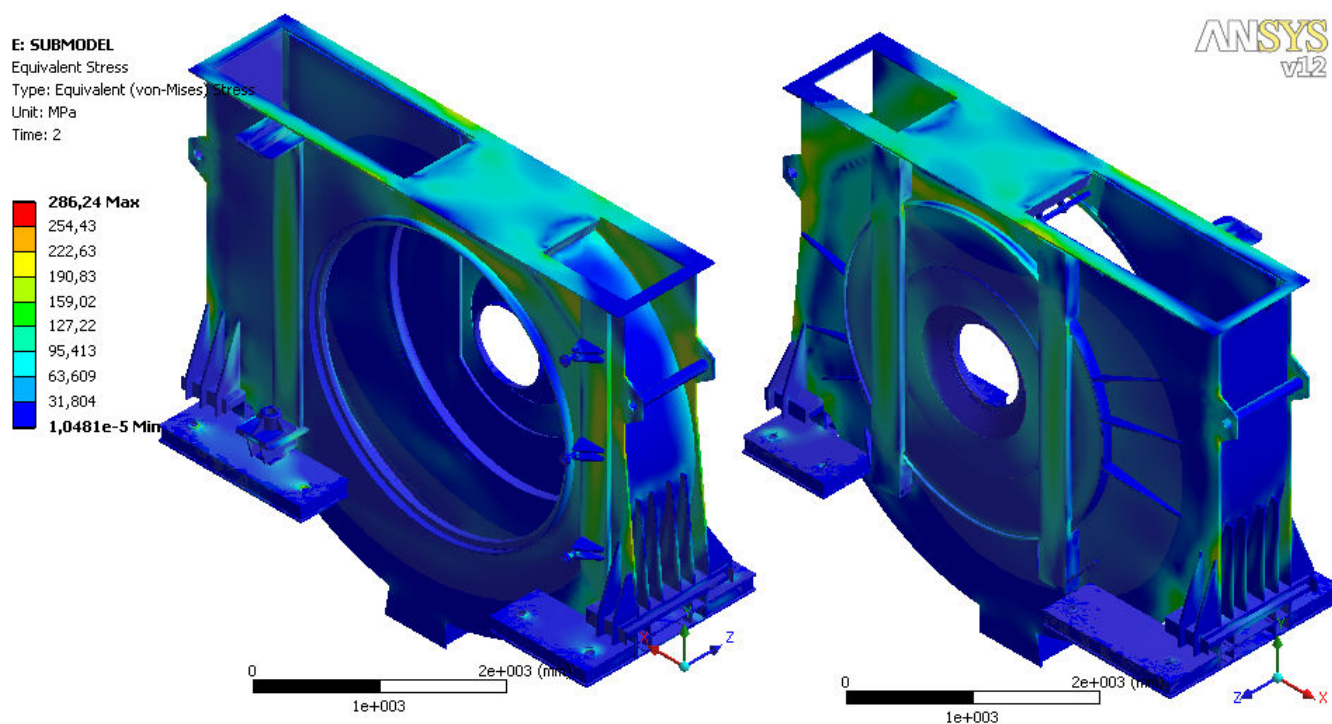
Obr.85 Návrh uložení kluzných desek v levé patce

4.7.2.2. Napěťová analýza

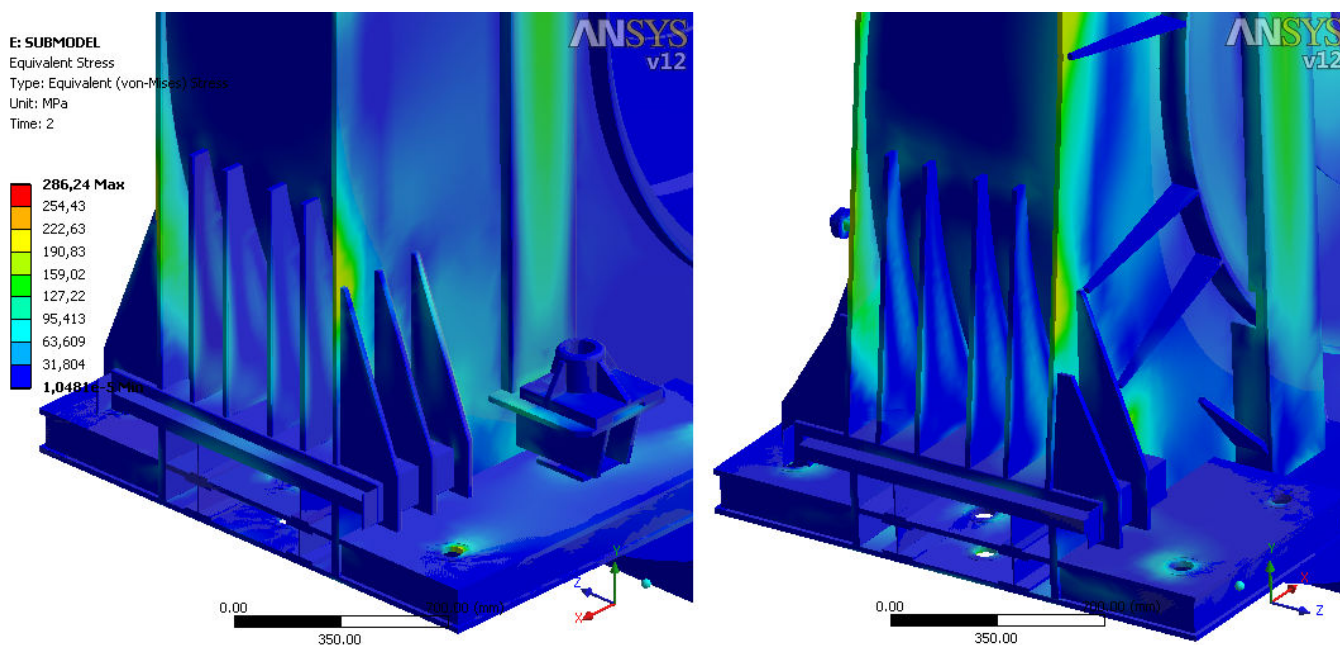
Z obrázků 86 a 87 je patrné rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM. Je zaznamenán pokles jeho maximální hodnoty oproti hrubé modelové soustavě. Vysoké hodnoty se vyskytují v oblasti pravého horního rohu skříně, ve vertikálních výtuhách a lokálně okolo patek. V žádném ze zmíněných míst nepřesahuje hodnotu 150 MPa .

Plastické deformace znázorněné na obrázku 88 dosahují maxima 0,0045. Tato hodnota je ovšem opět špička, způsobená diskretizací kontinua. Při analyzování plastických zón vyplývá, že podstatná část těchto deformací nepřesáhne 0,0005. Vzhledem k jejich rozmístění a zanedbatelné velikosti je možno konstatovat, že nemají vliv na činnost technické soustavy a není nutno jim přisuzovat vyššího významu.

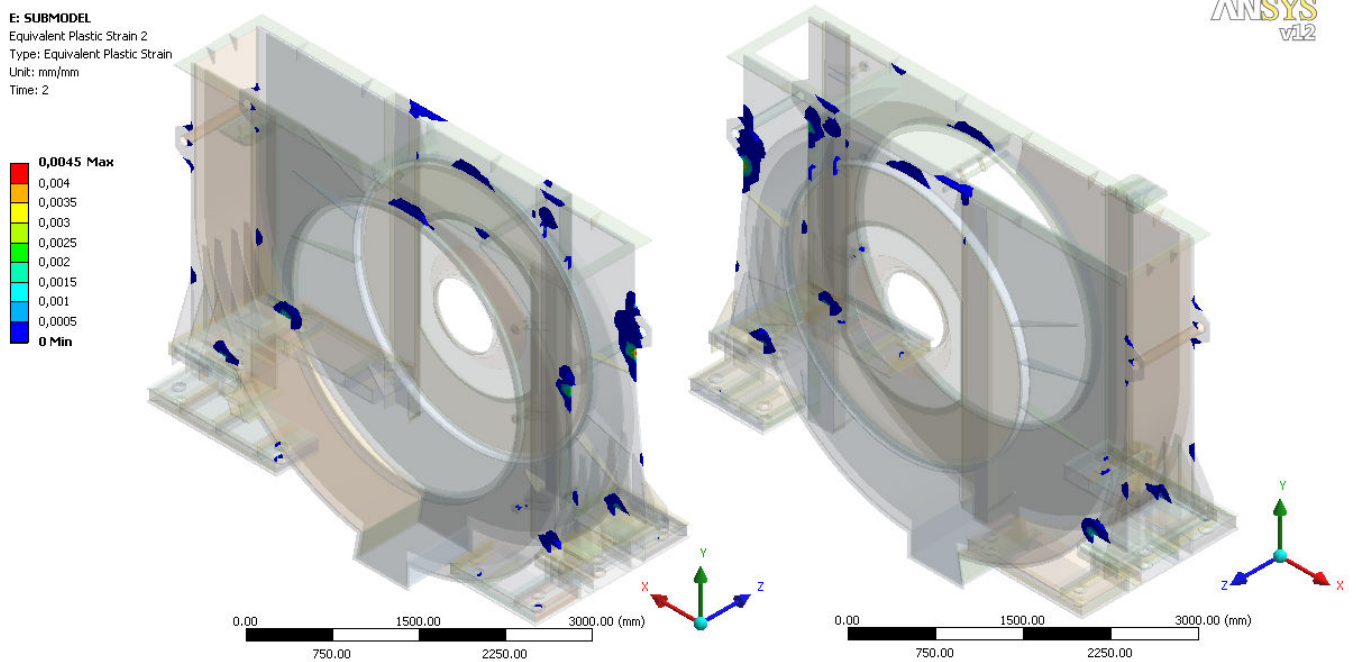
Srovnáním rozložení hlavních napětí (obr. 89, 90 a 91) bylo dospěno k závěru, že se na skříně mlýna nevyskytuje žádné konkrétní místo, které by bylo nebezpečné z hlediska vzniku trhlin, tzn. nenachází se žádné takové místo, kde jsou dvě, popř. všechna tři hlavní napětí tahová. Naopak, podstatná část skříně mlýna je kombinací tahových a tlakových hlavních napětí.



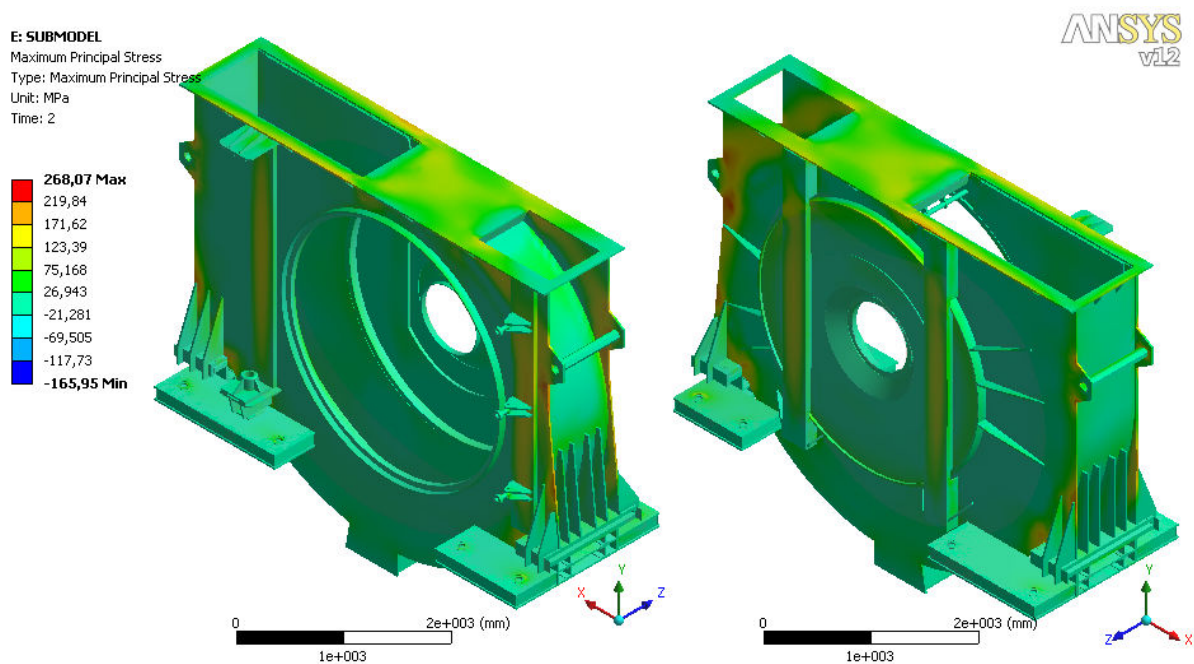
Obr.86 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 1



Obr.87 Rozložení redukovaného napětí dle HMH – pohled 2



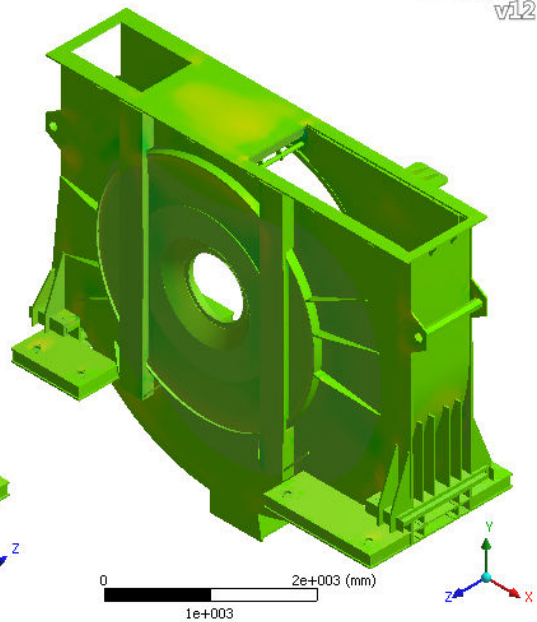
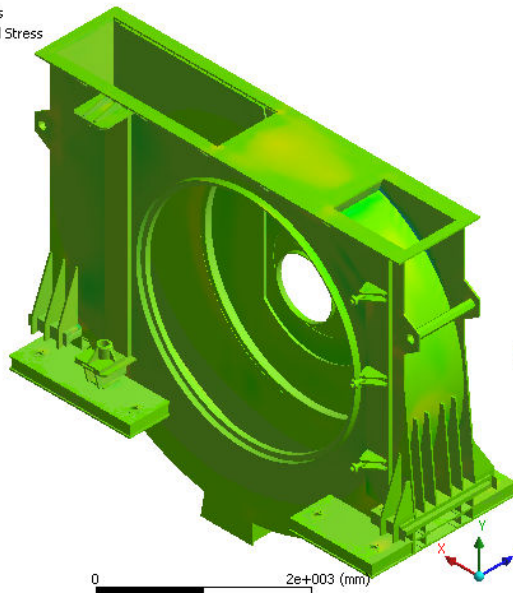
Obr.88 Plastická deformace



Obr.89 Rozložení prvního hlavního napětí

E: SUBMODEL
Middle Principal Stress
Type: Middle Principal Stress
Unit: MPa
Time: 2

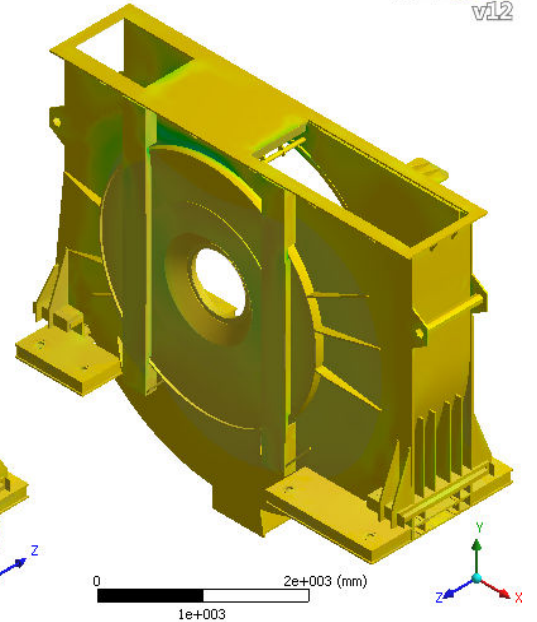
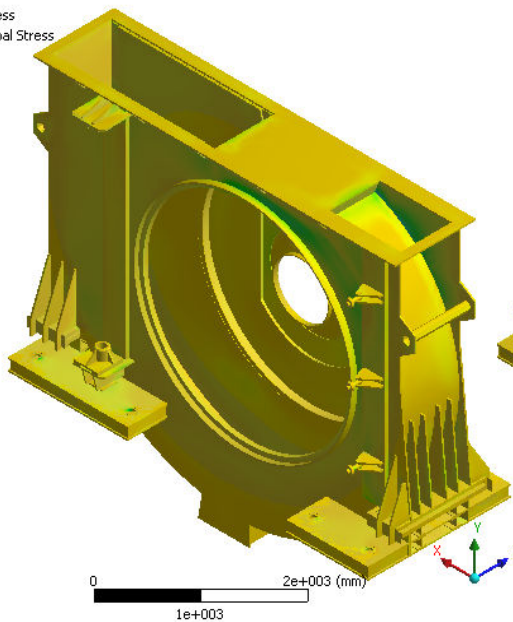
217,23 Max
160,04
102,86
45,682
-11,5
-68,681
-125,86
-183,04
-240,22
-297,41 Min



Obr.90 Rozložení druhého hlavního napětí

E: SUBMODEL
Minimum Principal Stress
Type: Minimum Principal Stress
Unit: MPa
Time: 2

121,93 Max
61,832
1,7324
-58,367
-118,47
-178,57
-238,67
-298,76
-358,86
-418,96 Min



Obr.91 Rozložení třetího hlavního napětí

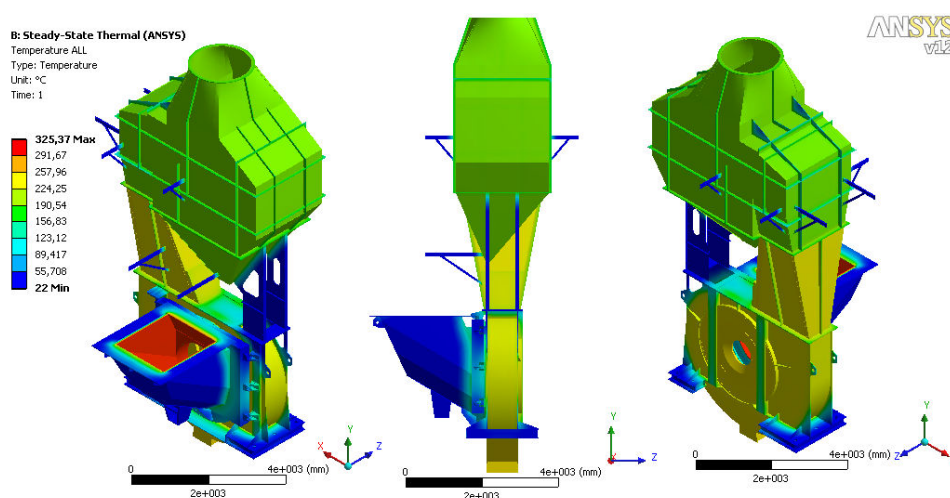
5. SROVNÁNÍ KONSTRUKČNÍCH VARIANT

Po prostudování výsledků obou variant bylo zvoleno vícero srovnávacích kritérií. Jedná se o rozložení teplot, posuvy, rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM a rozsah plastických deformací. Veškerá srovnání se provádí na submodelech, výjimku tvoří rozložení teplot hrubých modelových soustav – viz obrázky 92 a 93.

5.1. Srovnání rozložení teplot

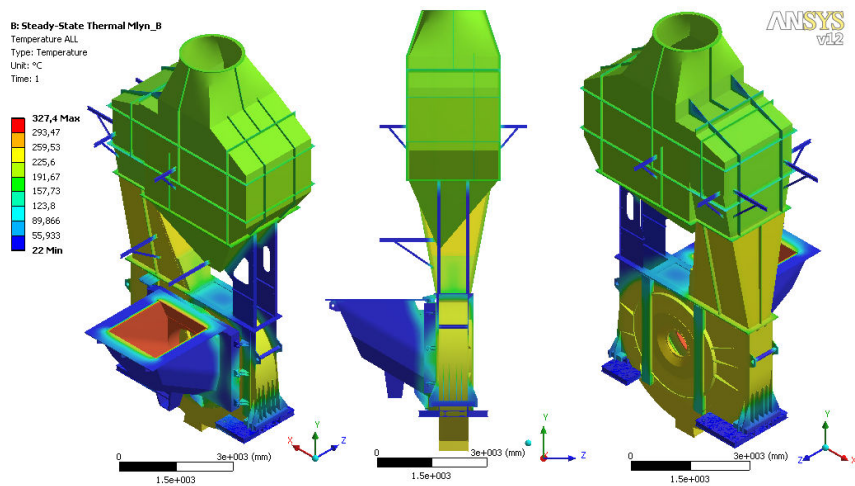
Při porovnání rozložení teplot lze konstatovat, že volba konstrukčního provedení nemá vliv na povrchové teploty technické soustavy. Veškerá bezpečnostní opatření prováděná na stávající konstrukční variantě lze aplikovat i na nově navrhovanou variantu. Výjimku tvoří patky varianty B. Jejich povrchová teplota je výrazně nižší než u varianty A. To je způsobeno tím, že nedochází k transportu tepla z vnitřních prostor skříně prostřednictvím plechů až do patek. Ty jsou se skříní spojeny pouze pěti teflonovými kluznými deskami. Přenos tepla sáláním z mlecí části skříně do okolního vzduchu a následným pohlcením patek je v tomto výpočtu zanedbán.

Na obrázcích 94 a 95 jsou zobrazeny teploty patek a ve vybraných místech jsou vypsány konkrétní číselné hodnoty ve °C. Nižší povrchové teploty daných oblastí u varianty B umožní umístění snímačů a případných dalších technologií, které nebudou natolik tepelně ovlivněny.

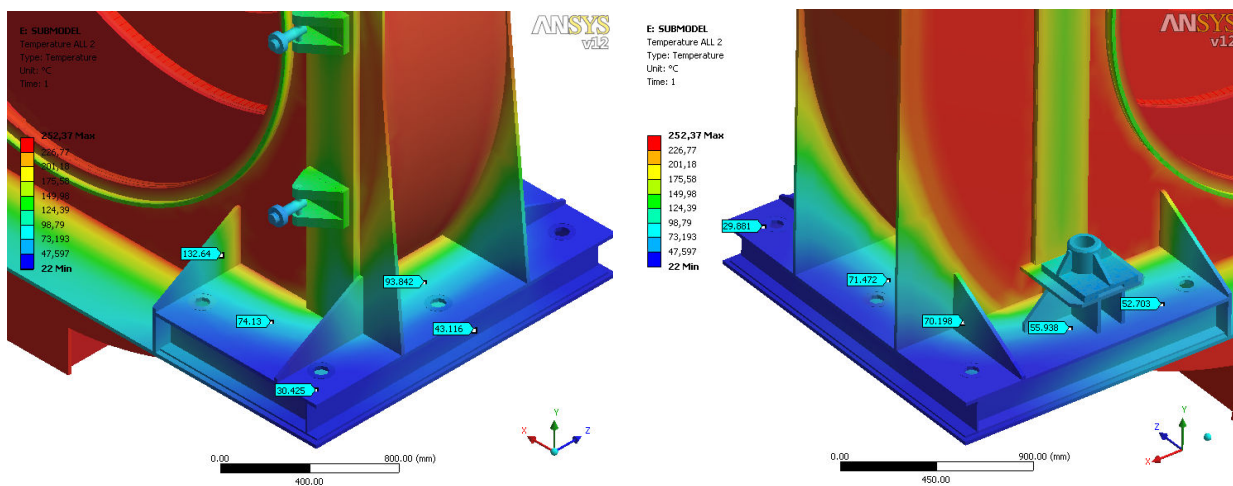


Obr.92 Rozložení teplot konstrukční varianty A

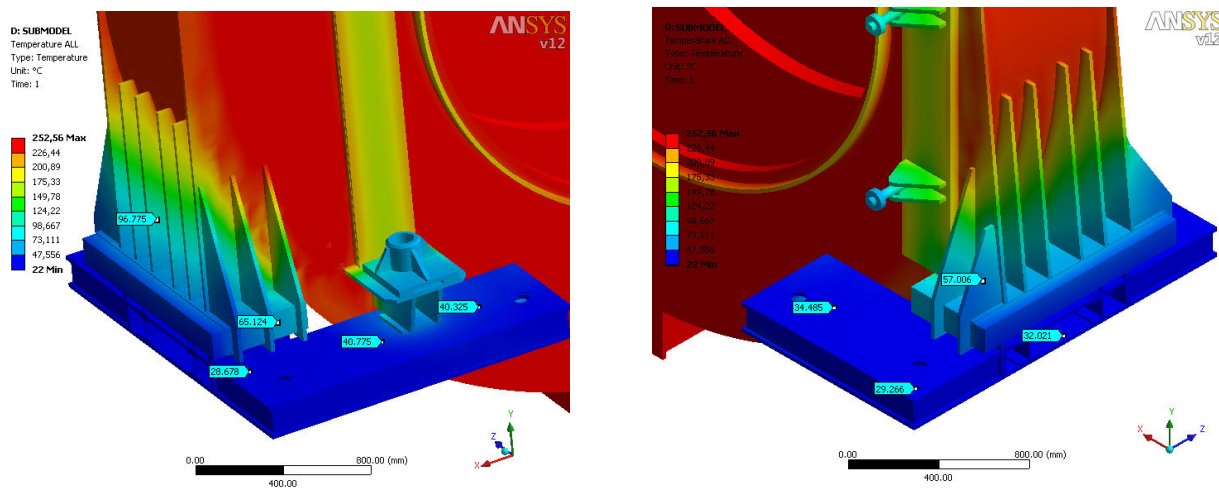
Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



Obr.93 Rozložení teplot konstrukční varianty B



Obr.94 Teploty patek konstrukční varianty A

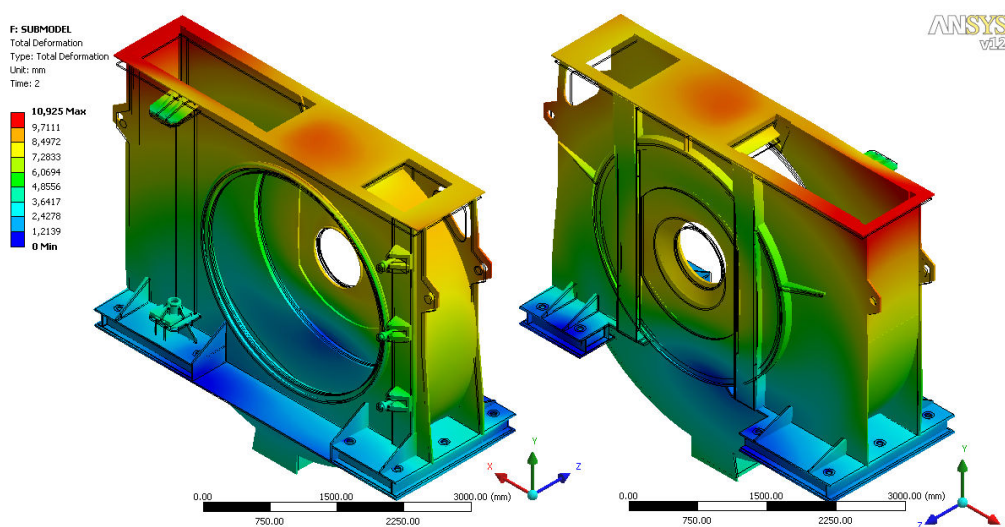


Obr.95 Teploty patek konstrukční varianty B

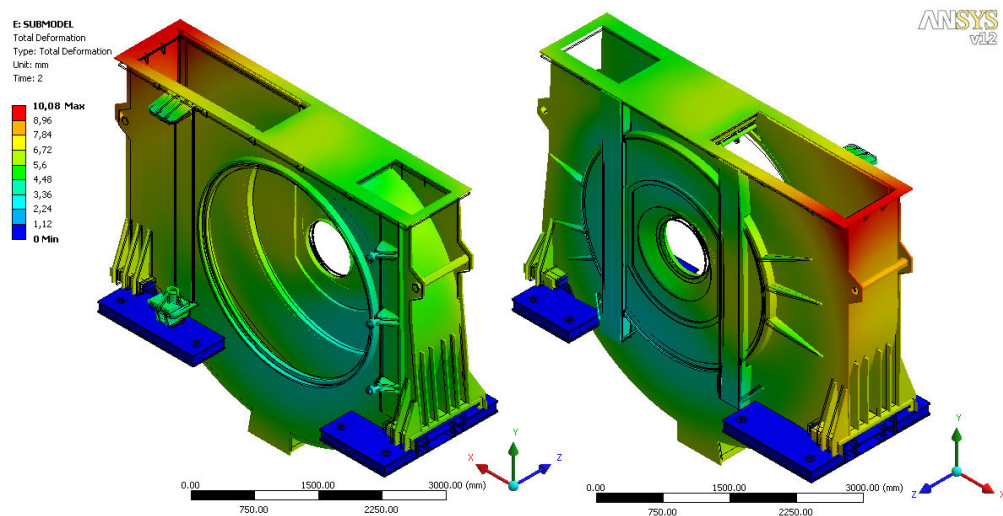
5.2. Srovnání posuvů

Druhým srovnávacím kritériem jsou posuvy skříně mlýna. Ze srovnání celkových posuvů je patrné, že volba konstrukčního provedení nijak výrazně neovlivní celkové ani dílčí posuvy v jednotlivých směrech. Na obrázcích 98 a 99 jsou zobrazeny celkové posuvy vektorově s 10-ti násobným zvětšením. U obou variant dochází k propadu čelní a týlní stěny dovnitř skříně, tento jev je přesněji znázorněn na obrázcích 100 a 101. U konstrukční varianty A jsou větší posuvy ve směru osy z (osa hřídele) na týlní straně (strana převodovky). Dosahují až 9 mm a na čelní straně (strana vrat) jsou rovny přibližně 3,5 mm. Nově navrhovaná varianta má menší posuvy týlní strany, necelých 6,5 mm, větší posuvy se ale vyskytují na čelní straně, téměř 5,5 mm. Z hlediska zachování dostatečné vůle mezi skříní a mlecím kolem je příznivější varianta B.

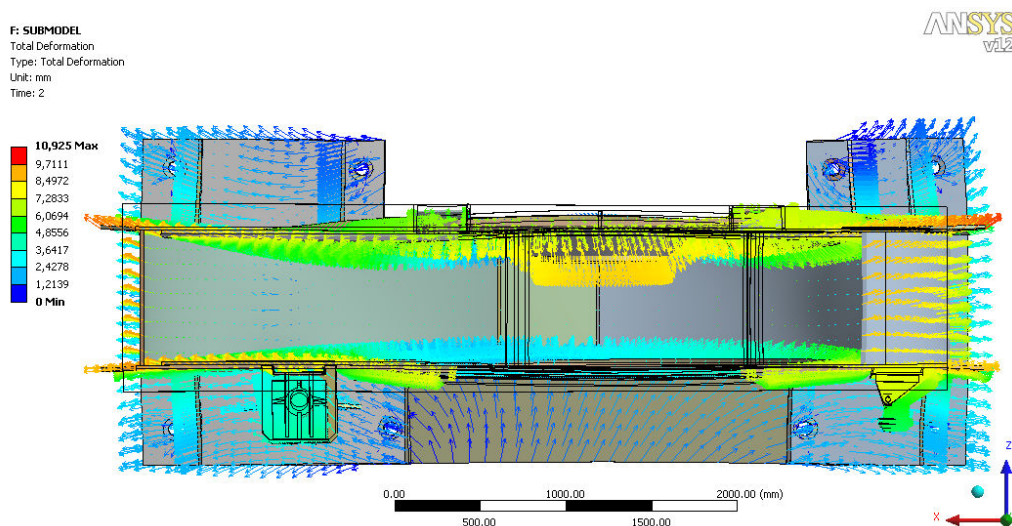
U varianty B jsou posuvy ve směru osy x nepatrně vyšší, přesto jsou jejich hodnoty srovnatelné. Vzhledem k tomu, že konstrukční varianta B umožňuje volný posuv v horizontální rovině oproti variantě A a jejich posuvy jsou srovnatelné, je zde předpoklad vzniku větších napětí u konstrukční varianty A.



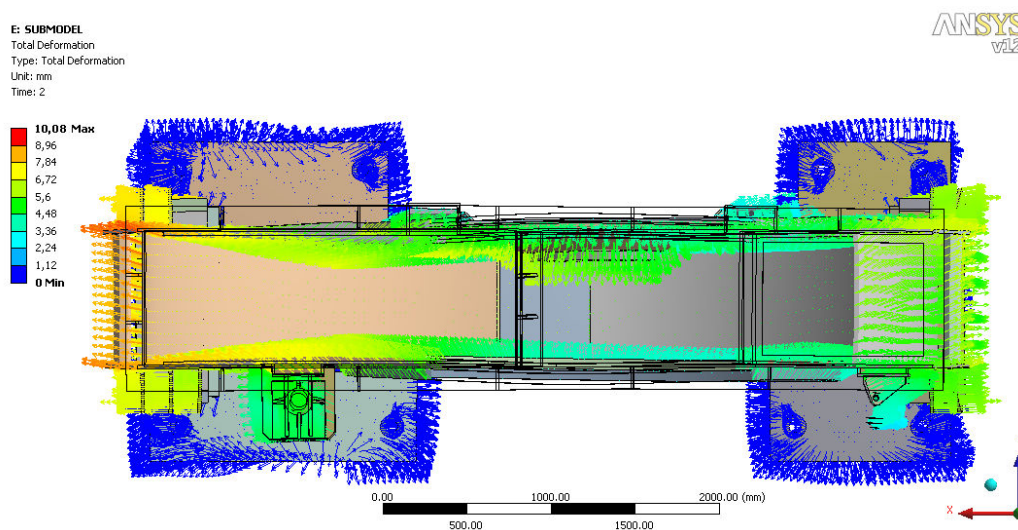
Obr.96 Celkové posuvy konstrukční varianty A – zvětšeno 10x



Obr.97 Celkové posuvy konstrukční varianty B – zvětšeno 10x



Obr.98 Celkové posuvy konstrukční varianty A, zobrazeny vektorově – zvětšeno 10x

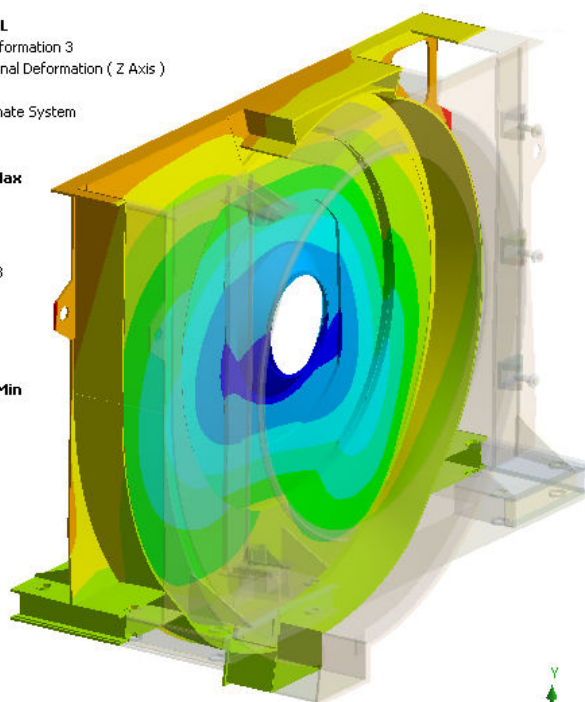


Obr.99 Celkové posuvy konstrukční varianty B, zobrazeno vektorově – zvětšeno 10x

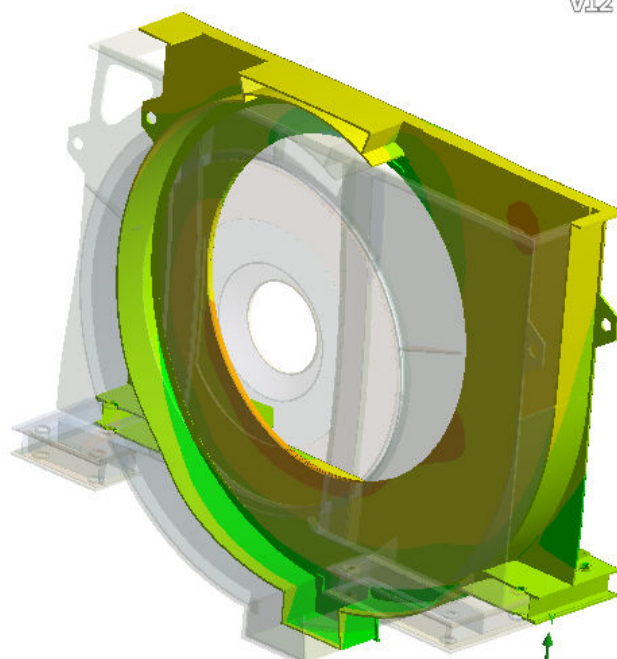
F: SUBMODEL

Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation (Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 2

5,916 Max
4,2556
2,6111
0,96667
-0,67778
-2,3222
-3,9667
-5,6111
-7,2556
-8,903 Min



0.00 1000.00 (mm)
500.00



0.00 1000.00 (mm)
500.00

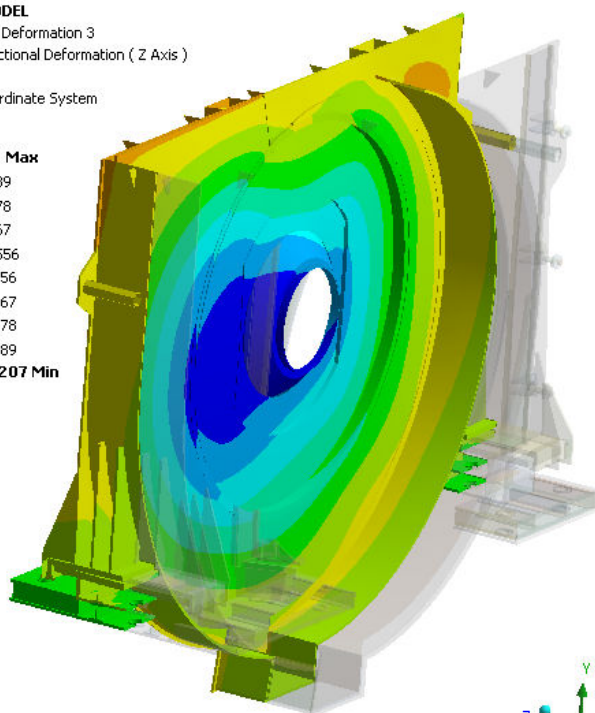
ANSYS
v12

Obr.100 Posuvy ve směru z konstrukční varianty A – zvětšeno 10x

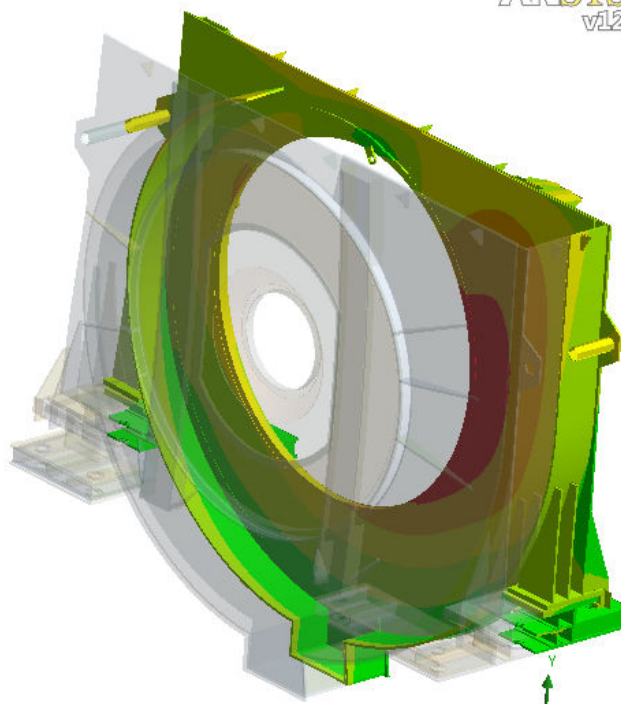
E: SUBMODEL

Directional Deformation 3
Type: Directional Deformation (Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 2

5,44 Max
4,0889
2,7778
1,4667
0,15556
-1,1556
-2,4667
-3,7778
-5,0889
-6,4207 Min



0.00 1000.00 (mm)
500.00



0.00 1000.00 (mm)
500.00

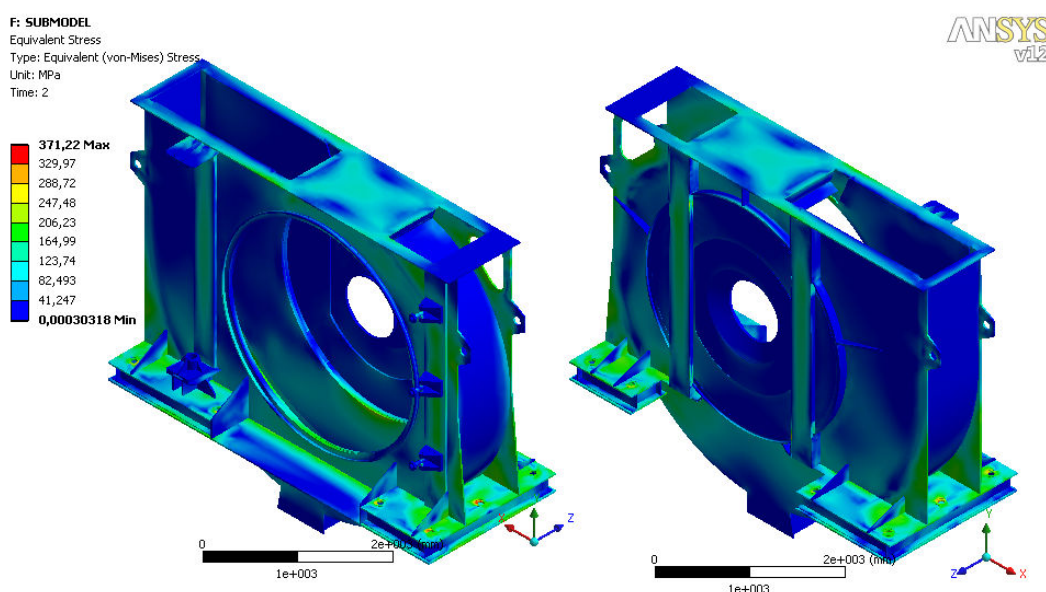
ANSYS
v12

Obr.101 Posuvy ve směru z konstrukční varianty B – zvětšeno 10x

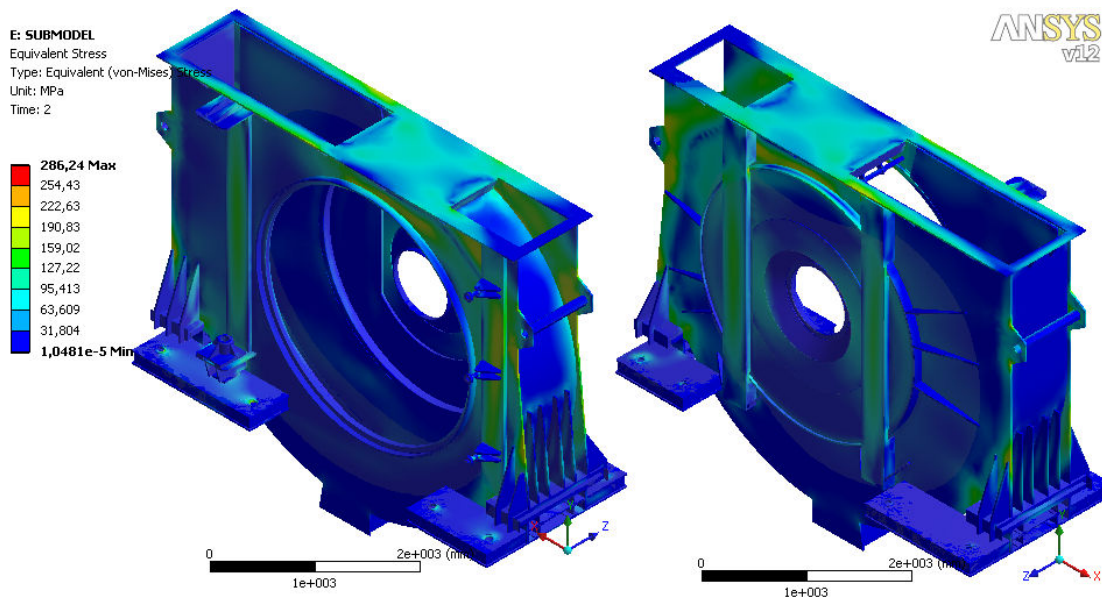
5.3. Srovnání rozložení redukovaného napětí

Pro zobrazení redukovaného napětí byla zvolena hypotéza HMH. Jeho rozložení je u obou variant na skříní mlýna přibližně stejné, podstatně se liší až v oblasti patek. Pro větší názornost jsou na obrázcích 104 a 105 zobrazeny rozložení redukovaného napětí s 10-ti násobným zvětšením posuvů a do obrázků jsou vykresleny kontury nedeformovaného tělesa.

Pokles redukovaného napětí na patkách konstrukční varianty B lze připsat jejímu uložení na kluzných deskách. Tepelné dilataci není nijak výrazně bráněno, a tudíž nevzniká tak vysoká napjatost jako ve variantě A.

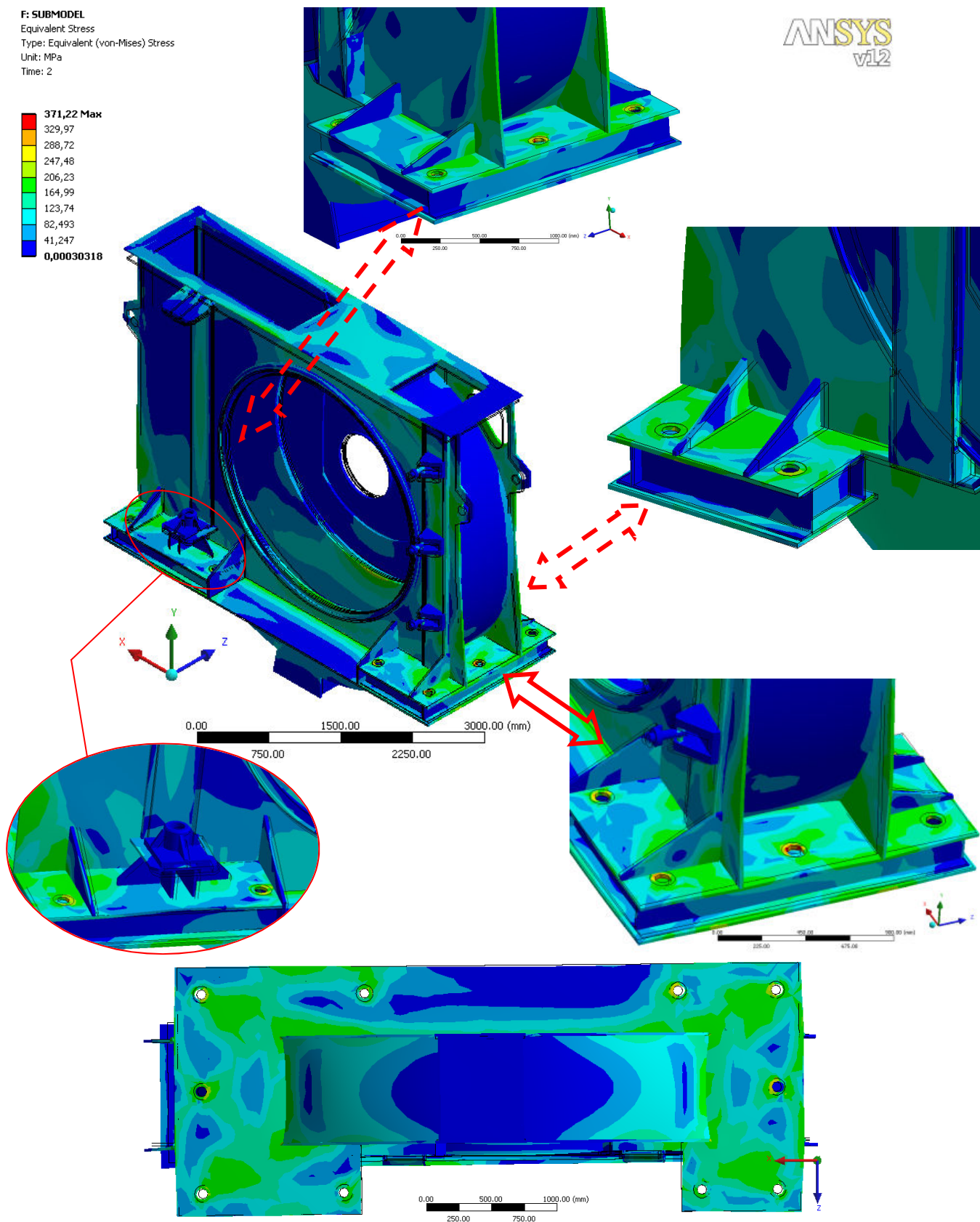


Obr.102 Rozložení redukovaného napětí dle HMH konstrukční varianty A

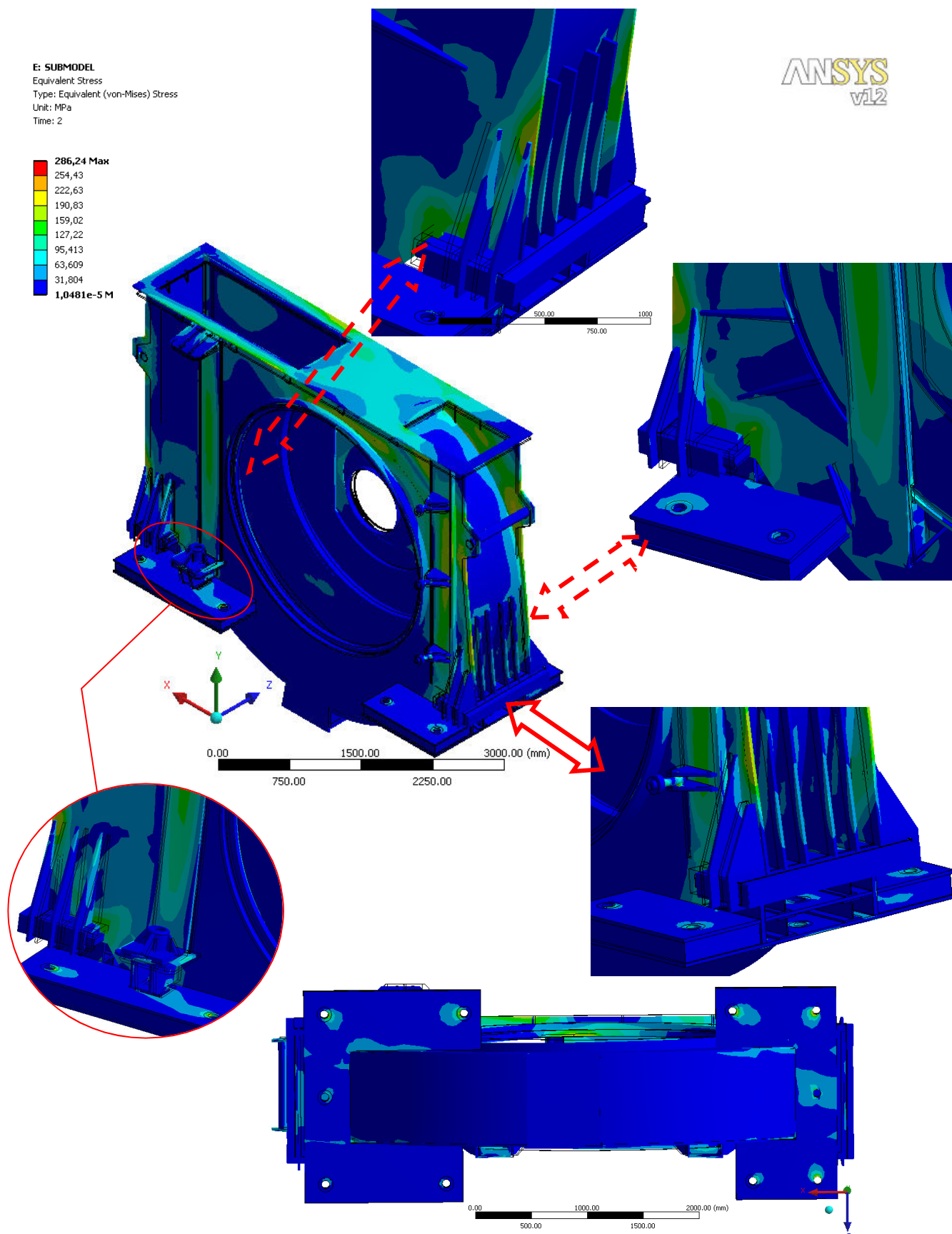


Obr.103 Rozložení redukovaného napětí dle HMH konstrukční varianty B

Srovnání dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna z hlediska jejich napjatosti a deformace



Obr.104 Rozložení redukovaného napětí dle HMH konstrukční varianty A, posuvy zvětšeny 10x

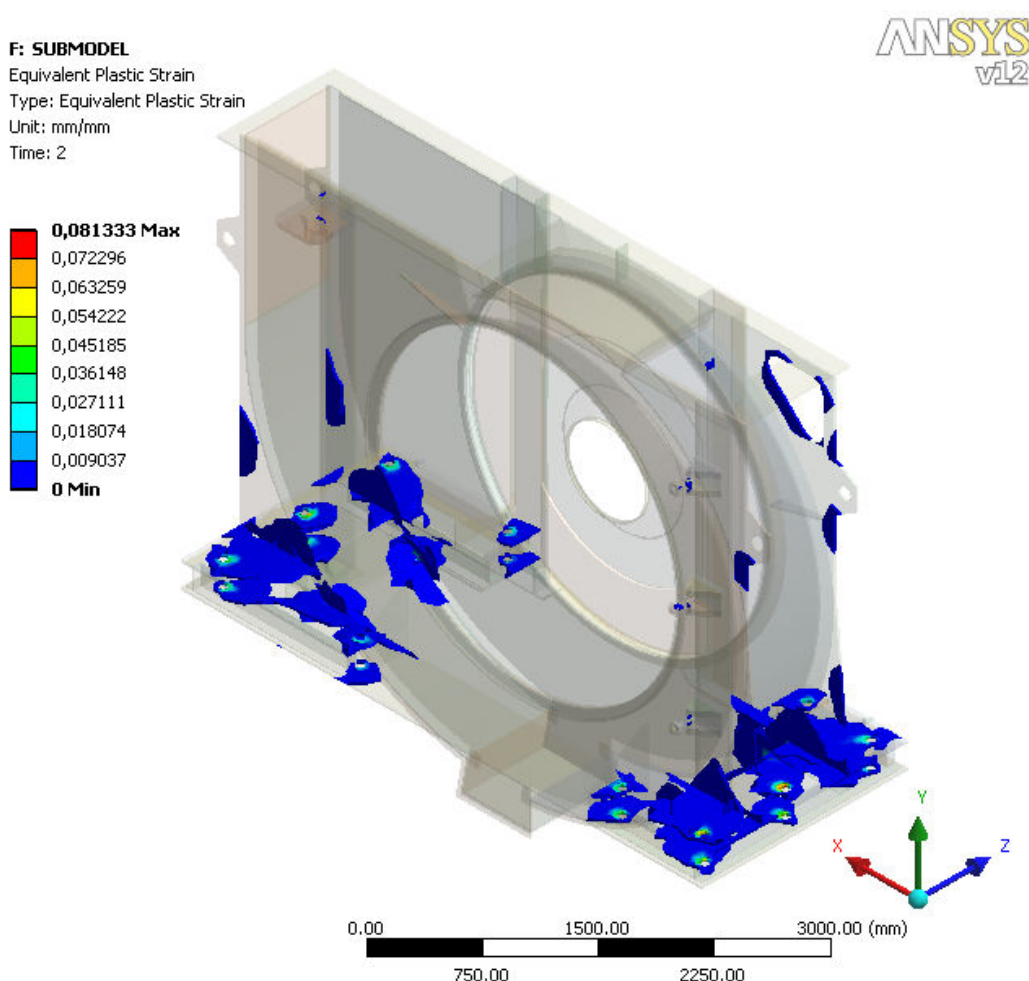


Obr.105 Rozložení redukovaného napětí dle HMM konstrukční varianty B, posuvy
zvětšeny 10x

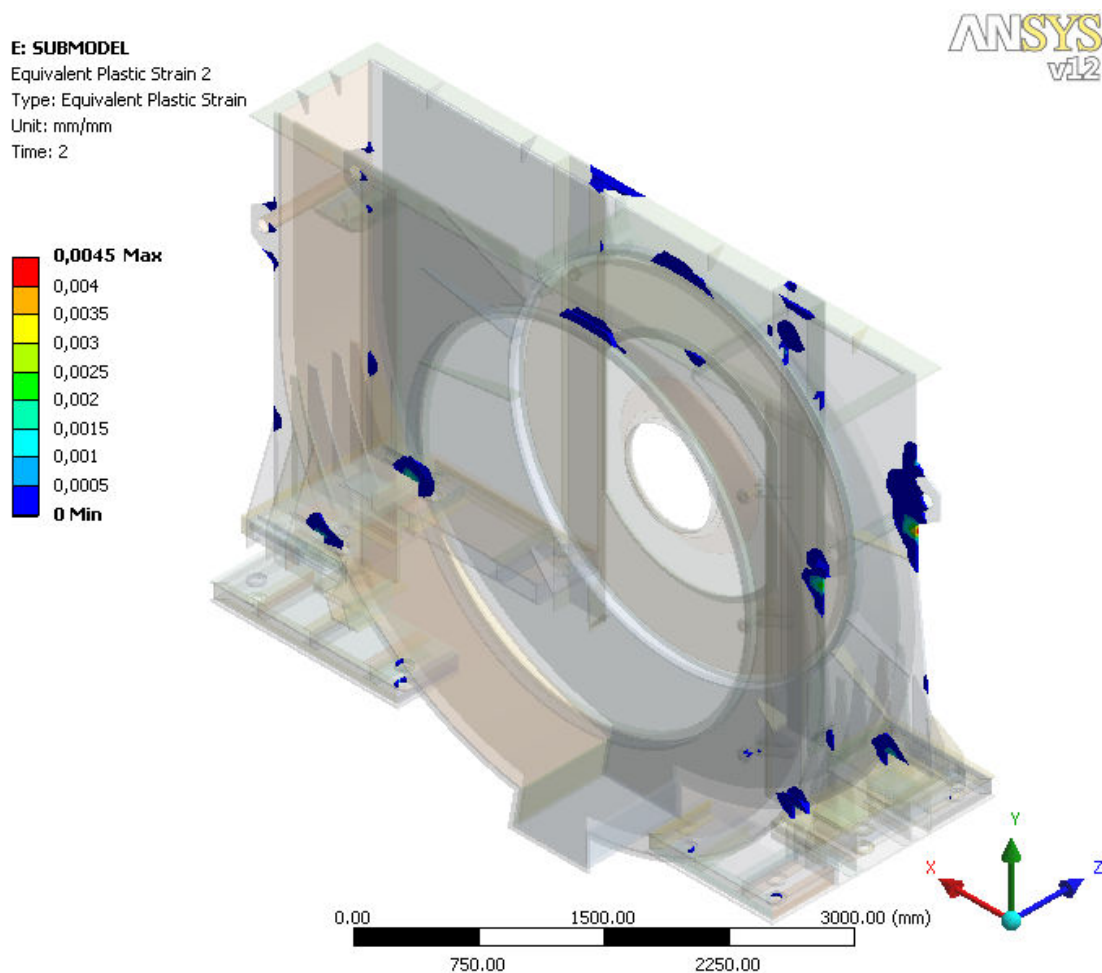
5.4. Srovnání výskytu plastických zón

Na obrázcích 106 a 107 jsou znázorněny oblasti, v nichž došlo k plastizaci materiálu. Výskyt plastických deformací na konstrukční variantě A je minimální. Dané oblasti se nacházejí převážně v oblasti patek a maximálních hodnot nabývají okolo otvorů pro kotevní prvky. Maximální hodnoty nejsou nijak výrazné a lze je ve vztahu k požadované činnosti technické soustavy zanedbat.

Maximální hodnoty konstrukční varianty B jsou téměř 20 krát nižší. Velikosti plastických deformací v tomto případě jsou minimální a hraničí s numerickou chybou způsobenou iteračním výpočtem.



Obr.106 Plastické deformace konstrukční varianty A



Obr.107 Plasticke deformace konstrukční varianty A

5.5. Stručný přehled

1. Volba konstrukční varianty nemá vliv na rozložení teplot, výjimku tvoří patky skříně varianty B, kde jsou nižší povrchové teploty
2. Z hlediska posuvů jsou obě varianty srovnatelné, u obou dochází k rozšíření skříně ve směru osy x a následně k propadu čelní a týlní strany dovnitř skříně
3. Maximální hodnoty posuvů jsou velmi podobné a vyskytují se ve stejných místech
4. Rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM je srovnatelné, výrazný pokles je zaznamenán na patkách konstrukční varianty B
5. Rozsah plastických deformací je u konstrukční varianty B zanedbatelný; u varianty A jsou tyto deformace minimální, činnosti technické soustavy nijak neovlivňují

6. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Úloha se zabývá deformační a napěťovou analýzou dvou konstrukčních variant spirálové skříně ventilátorového mlýna a jejich následného srovnání. Jednotlivé varianty se liší ve volbě uložení skříně mlýna. Původní varianta, označována A, předpokládá pevné spojení patek se skříní. Nově navrhovaná varianta, označena B, předpokládá rozdělení skříně na tři samostatné části: levou patku, pravou patku a skřín. Jednotlivé části jsou spojeny kluznými deskami, umožňujícími volný posuv v horizontální rovině.

Pro řešení byla zvolena metoda počítačového modelování, konkrétně metoda konečných prvků s využitím výpočtového software ANSYS Release 12 Workbench.

Sestavování výpočtových modelů si vyžádalo provést určitá zjednodušení, především v oblasti tvorby geometrických a materiálových modelů. Úloha byla rozšířena i na ty komponenty technické soustavy, které nebyly předmětem zkoumání, ale které byly označeny za podstatné z hlediska deformačních a napěťových poměrů na skříní mlýna. Jedná se o třídič usazený nad skříní a vrata umístěna v přední části skříně. Vzhledem k tomuto rozšíření bylo následně přistoupeno k metodě submodelingu, kdy byly z hrubé modelové soustavy pro každou konstrukční variantu přeneseny na detailní modelovou soustavu uzlové teploty a uzlové posuvy vybraných ploch. Detailní modelová soustava byla diskretizována větším počtem konečným prvků a na ní byly následně provedeny analýzy, z nichž byly vysloveny závěry.

Zjednodušení geometrických modelů se především týkalo radiálního pancéřování uvnitř skříně. U obou konstrukčních variant jsou jeho rozměry totožné, liší se pouze v uchycení v horní části skříně. Tato odlišnost nemá na rozložení teplot ani na silové účinky významný vliv. Ze všech modelových soustav bylo vynecháno, jeho hmotnost byla do výpočtů zahrnuta v podobě tíhových sil zadaných na vybrané vnitřní plochy skříně. Tepelné izolační vlastnosti byly analyzovány v odděleném výpočtu, jehož výsledkem byly teploty na vnitřních plochách spirálové části skříně. Tyto teploty byly uvažovány ve všech následujících výpočtech. Kotevní prvky byly vynechány a nahrazeny kinematickými okrajovými podmínkami. V průběhu výpočtu byly v místech okolo kotevních prvků zaznamenány špičky napětí (převážně v hrubých modelových soustavách), z čehož lze vyvodit, že zvolené

kinematické podmínky jsou poměrně silné, protože neuvažují tuhost, resp. poddajnost, kotevních tyčí.

Srovnáním povrchových teplot vyplývá, že volba uložení skříně nijak významně rozložení teplot neovlivní, výjimku tvoří patky varianty B, kde je zaznamenán pokles teplot v těsné blízkosti skříně. Tento pokles funkci technické soustavy nijak významně neovlivní, je výhodný zejména z hlediska umístění snímačů, popř. jiných technologií.

Obě konstrukční varianty se vyznačují podobným rozložením celkových posuvů. Jedná se především o roztahování skříně ve směru osy x a následný propad čelní a týlní strany dovnitř skříně. Varianta A se vyznačuje vyšším posuvem týlní strany směrem dovnitř skříně, tento posuv dosahuje přibližně 9 mm . U varianty B jsou posuvy týlní strany $6,5\text{ mm}$ a čelní strany $5,5\text{ mm}$. Z hlediska zachování dostatečné vůle mezi skříní a mlecím kolem je příznivější varianta B.

Největší rozdíly mezi oběma konstrukčními variantami jsou patrné u rozložení napětí. Zvoleným srovnávacím kritériem je rozložení redukovaného napětí dle hypotézy HMM. Maximální hodnoty napětí (při zanedbání špiček napětí) jsou srovnatelné, včetně míst, kde se vyskytují. Podstatný rozdíl se projevil v oblasti patek, kde u nově navrhované varianty nepřesahuje napětí 30 MPa , výjimku tvoří oblasti okolo kotevních prvků, kde napětí dosahuje vyšších hodnot.

S výskytem špiček napětí jsou úzce spojeny plastické deformace. Z jejich vzájemného porovnání lze konstatovat, že u nově navrhované varianty se nevyskytují žádné oblasti, v nichž by plastické deformace měly vyššího významu a mohly by ovlivnit činnost technické soustavy. U konstrukční varianty A se vyskytují plastické deformace převážně okolo kotevních prvků. Nabývají také mnohem vyšších hodnot než u varianty B. Z hlediska chodu technické soustavy je jejich výskyt také zanedbatelný. Projevit se ovšem mohou při cyklickém zatěžování, kdy bude skřín v pravidelných intervalech zahřívána a následně ochlazována. Zde by mohlo dojít k rozšíření plastických deformací a k následnému porušení materiálu. U konstrukční varianty B je toto riziko minimalizováno.

Při analýze kontaktních tlaků mezi kluznými deskami bylo zjištěno, že v levé patce dochází lokálně k překročení dovoleného zatížení kluzné desky. Veškeré navrhované kluzné desky mají únosnost 10 MPa , přičemž špičková hodnota tlaku dosahuje až $13,6\text{ MPa}$. Tato hodnota se vyskytuje lokálně v rohu desky a lze ji připsat nepřesné diskretizaci a následně

chybě vzniklé při numerickém výpočtu. Přesto se doporučuje desky v levé patce zvětšit, popř. pozměnit jejich rozmístění.

Volba uložení skříně na kluzné desky se z hlediska napjatosti skříně a výskytu plastických deformací jeví jako výhodnější a lze ji po provedení MKP analýzy doporučit.

6.1. Nejasnosti zanesené do výpočtových modelů

V průběhu řešení práce bylo přistoupeno k několika zjednodušením. Některá z nich byla způsobena nedostatkem informací a podkladů pro vyhotovení přesnějších výpočetních modelů. Tyto nejasnosti mohly vnést do výpočtů určité nepřesnosti, na které je nutno brát ohled při vyhodnocování výsledků. Lze identifikovat dva základní typy nejasností: materiálové a zatěžovací.

Sestavení materiálových modelů bylo ovlivněno nedostatkem informací o materiálech užitých na původní konstrukční variantě. Převážně u ocelí se mohly projevit změny fyzikálních vlastností vlivem degradačních procesů, působících v průběhu činnosti zařízení. Složení betonových směsí (žárobeton a betonové podloží) také není přesně známo. Materiálové parametry se určovaly na základě odborného odhadu a zkušeností osob do této problematiky zainteresovaných. Modelování značně nelineárního asfaltového podloží a pryžového těsnění jako materiálů lineárních je nepřesné. Zde k této alternativě mohlo být přistoupeno, neboť ani jeden z materiálů se nevyskytuje v oblasti, jež je předmětem zkoumání této práce.

Obdobná problematika se objevuje i u nově navrhované konstrukční varianty. V průběhu projektování a následného sestavování výpočtových modelů nebyly známy konkrétní typy užitých materiálů, ale pouze jejich základní zařazení (konstrukční ocel vhodná pro svařování s možností užití za zvýšených teplot, ušlechtilá žárovevná ocel s vyšším podílem manganu, pryž užívaná na těsnění).

Zatížení zkoumané technické soustavy je v této práci považováno za stacionární, s časem neměnné. Povrchové teploty na vnitřních částech soustavy a teploty média v ní zpracovávané, jsou určeny měřeními a přibližným výpočtem. Jejich rozložení není zcela konstantní a v průběhu činnosti mletí se mohou nepatrně lišit. Před vstupem do vrat jsou míchány spaliny, temperanční vzduch a uhlí určené k mletí. V průběhu mletí dochází jak ke

změně struktury směsi, tak ke změně skupenství části směsi (voda obsažená v uhlí se vypařuje). Změna kvality uhlí (obsah vody) může, do jisté míry, dále ovlivnit rozložení teplot.

Kromě mletí směsi, plní mlýn také funkci ventilátoru, kdy je ve vratech nepatrný podtlak a směrem k třidiči a jeho ústí se mění v nepatrný přetlak. Tyto tlaky jsou rovněž závislé na teplotě a složení směsi. Jejich rozložení je obtížně zjistitelné. Vzhledem k tomu, že se jedná o hodnoty blízké atmosférickému tlaku, nebyly do výpočtů zahrnuty.

6.2. Návrhy pro budoucí analýzy

Soubor výsledků získaných touto prací je vhodným podkladem pro projektování nové konstrukční varianty. V případě zájmu o hlubší proniknutí do problematiky napěťových a deformačních stavů v průběhu činnosti technické soustavy je možno přistoupit k dalším analýzám, popřípadě analýzy stávající rozšířit.

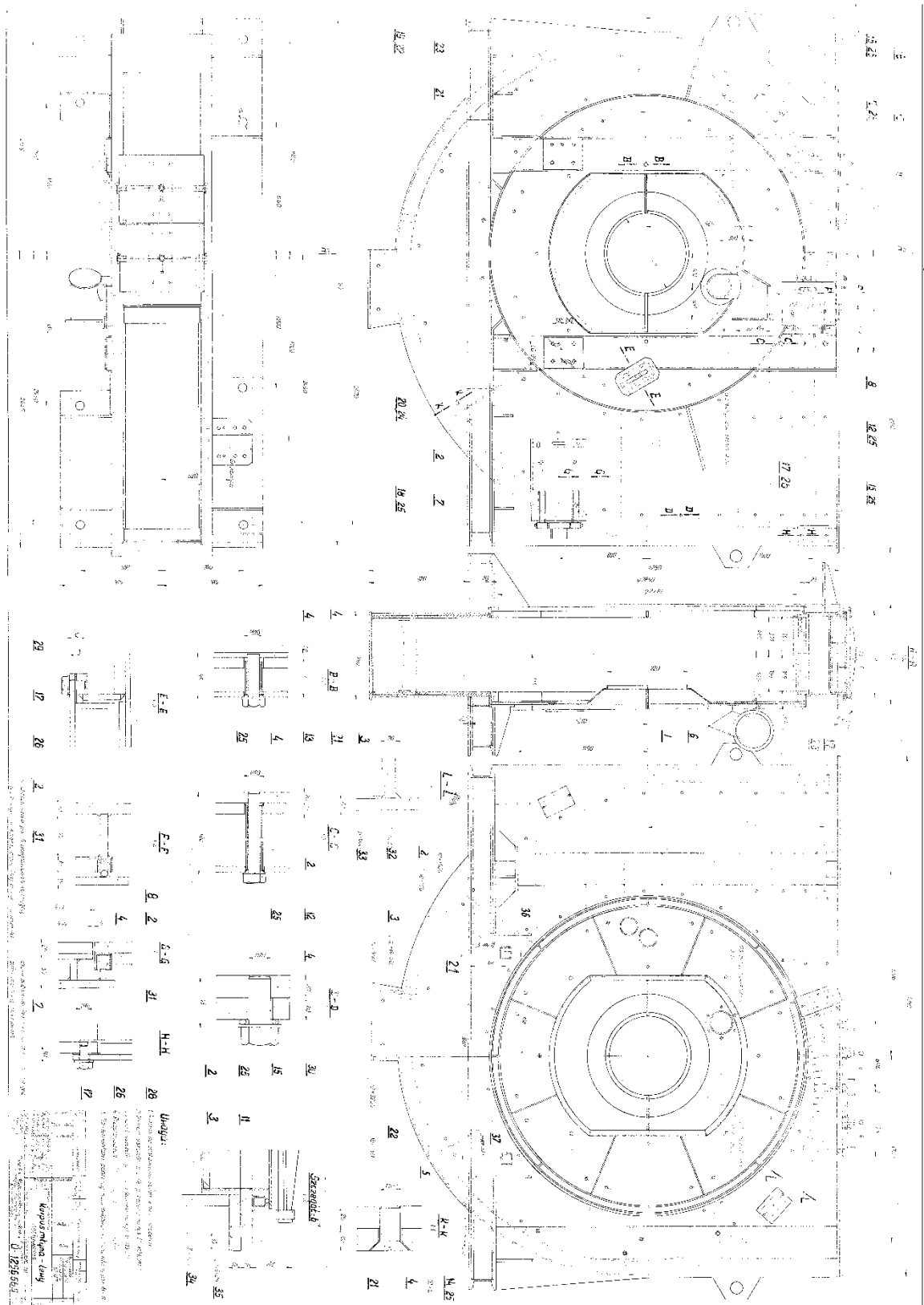
1. Variačním přístupem se může snížit neurčitost způsobená nepřesnými materiálovými vlastnostmi ocelí, betonového a asfaltového podloží. Provede-li se výpočet ve více etapách a v každé z nich se zohlední daný materiál jinými fyzikálními vlastnostmi, získá se přehled, do jaké míry tyto vlastnosti ovlivňují napěťové a deformační poměry na technické soustavě a zdali je nutno se na ně zaměřit podrobněji.
2. Obdobný variační přístup je možno uplatnit i u zatěžovacích stavů a povrchové teploty uvnitř vrat, skříně a třidiče zadávat v širším rozmezí.
3. Vynechání principu submodelingu. Vytvořením jednodušších hrubých modelových soustav je možno vyšetřit místa významná z hlediska velikosti posuvů, deformací a napětí. Následně je možno přistoupit k vytvoření hrubé modelové soustavy, v níž budou tyto místa diskretizována detailně a výpočet se provede opětovně na zpřesněné hrubé modelové soustavě. V prvotních výpočtových modelech mohou být všechny materiály pro zjednodušení uvažovány za zcela lineární.
4. Nosníky podepírající servisní plošiny a žebříky na třidiči je možno modelovat nosníkovými prvky, čímž se ušetří počet uzlů a následně i počet rovnic nutných pro výpočet.
5. Kotevní tyče nenahrazovat kinematickými okrajovými podmínkami, ale modelovat je jako poddajná tělesa, popř. je nahradit pružinami s odpovídající tuhostí.

7. LITERATURA

- [1] Technická dokumentace spirálové skříně ventilátorového mlýna a přílehlých komponent
- [2] MATOUŠŮ P., MĚCHURA V.: Vývoj energeticky nenáročné mlýnice šetrné k životnímu prostředí souhrnná zpráva za rok 2009 k projektu TIP FR-TI1/309, MORE 2009
- [3] KUBOŇ Z.: Zpráva EPRU T24/2009 Posouzení stavu materiálu stěny skříně ventilátorového mlýna elektrárny Prunéřov, Ostrava červen 2009
- [4] KUBOŇ Z.: Zpráva EPRU T17/2009 Posouzení stavu materiálu kola ventilátorového mlýna elektrárny Prunéřov, Ostrava květen 2009
- [5] FRYDRÝŠEK K., nosníky a rámy na pružném podkladu 1, 1. Vydání VŠB-TUO, Ostrava 2006
- [6] RAŽNĚVIČ K.: Termodynamické tabulky, 1. vydání ALFA, Bratislava 1984
- [7] HAŠEK P.: Tabulky pro tepelnou techniku, 2. vydání VŠB-TUO, Ostrava 1980
- [8] FÜRBAACHER I., MACEK K., STEIDL J., a kolektiv autorů: Lexikon technických materiálu se zahraničními ekvivalenty, 2004
- [9] Internetová databáze MatWeb: www.matweb.com
- [10] Internetová databáze The Engineering ToolBox: www.engineeringtoolbox.com
- [11] ANSYS Release 12 Documentation
- [12] KLUČKA R.: Deformační a napěťová analýza spirálové skříně ventilátorového mlýna, Ostrava 2008
- [13] NĚMEC J., DVOŘÁK J., HOSCHL C.: Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Praha 1989
- [14] JANÍČEK P., ONDRÁČEK J., VRBKA J.: Mechanika těles - pružnost a pevnost I., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno 1987
- [15] ONDRÁČEK J., VRBKA J., JANÍČEK P.: Mechanika těles - pružnost a pevnost II., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno 1988
- [16] KADLEC Z.: Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty, 1. vydání Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2009
- [17] IBG Monforts GmbH & Co. KG., www.ibg-monforts.de

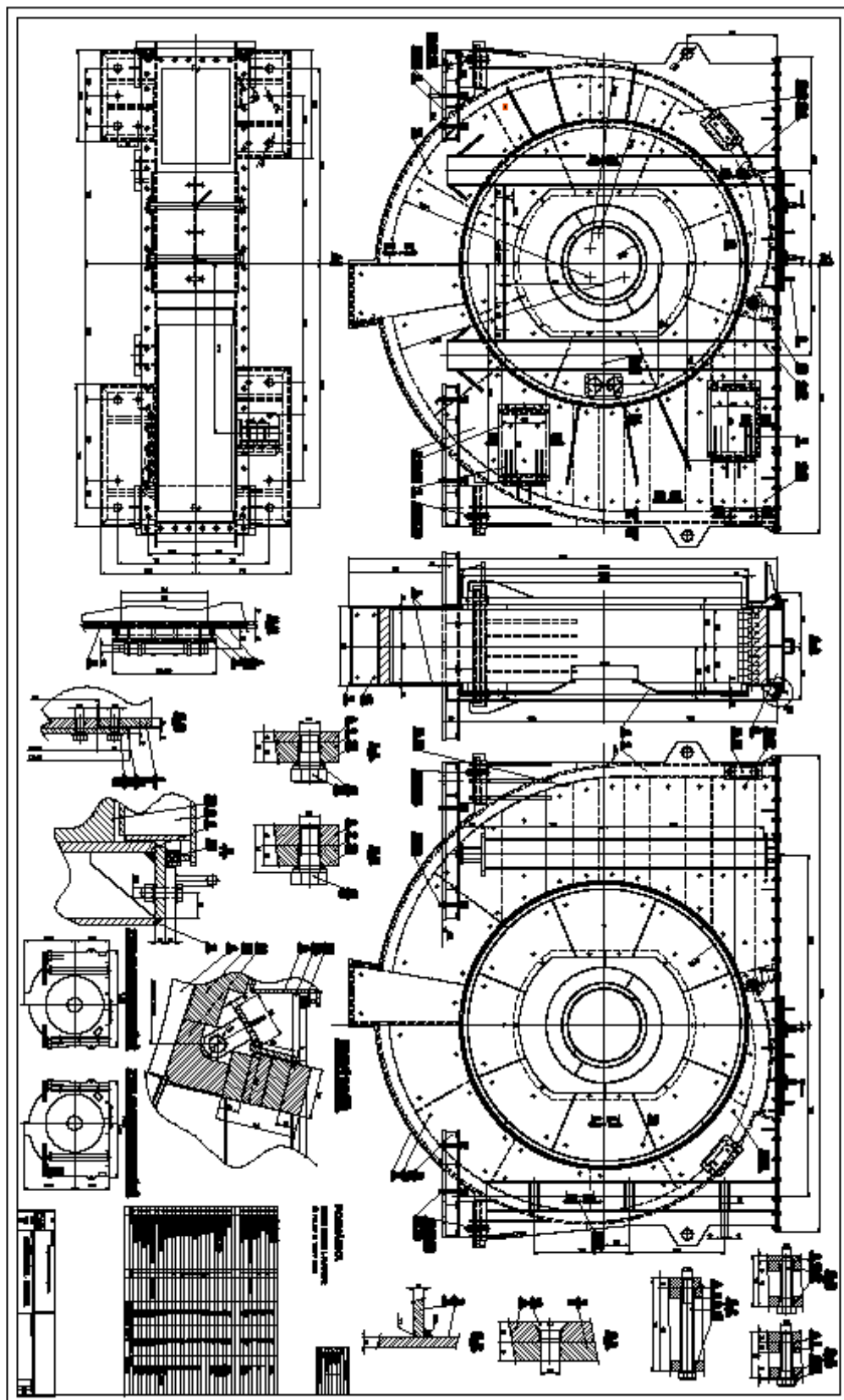
8. PŘÍLOHY

A1. Výkres skříně mlýna konstrukční varianty A

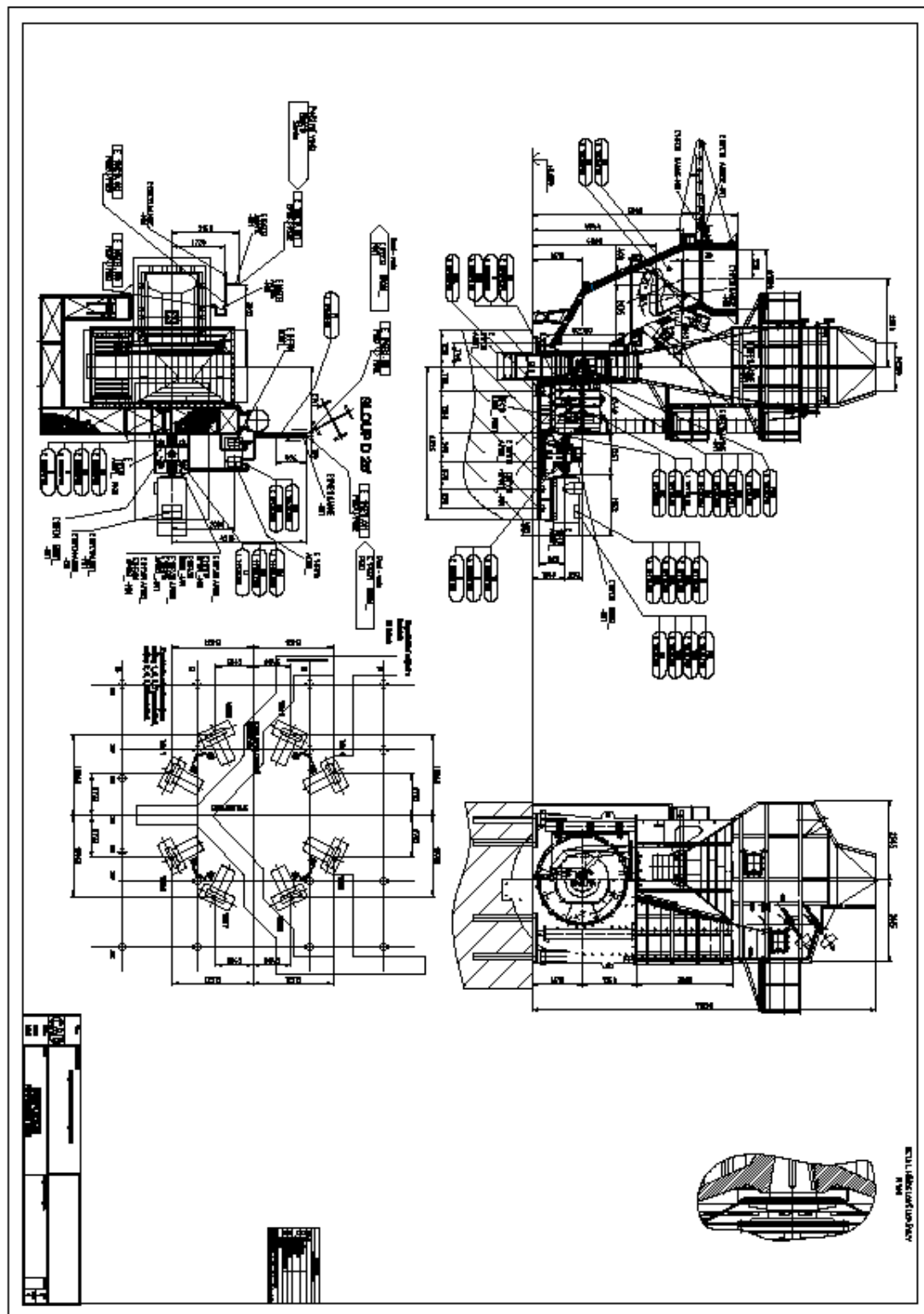


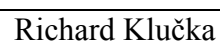


A3. Výkres skříně mlýna konstrukční varianty B

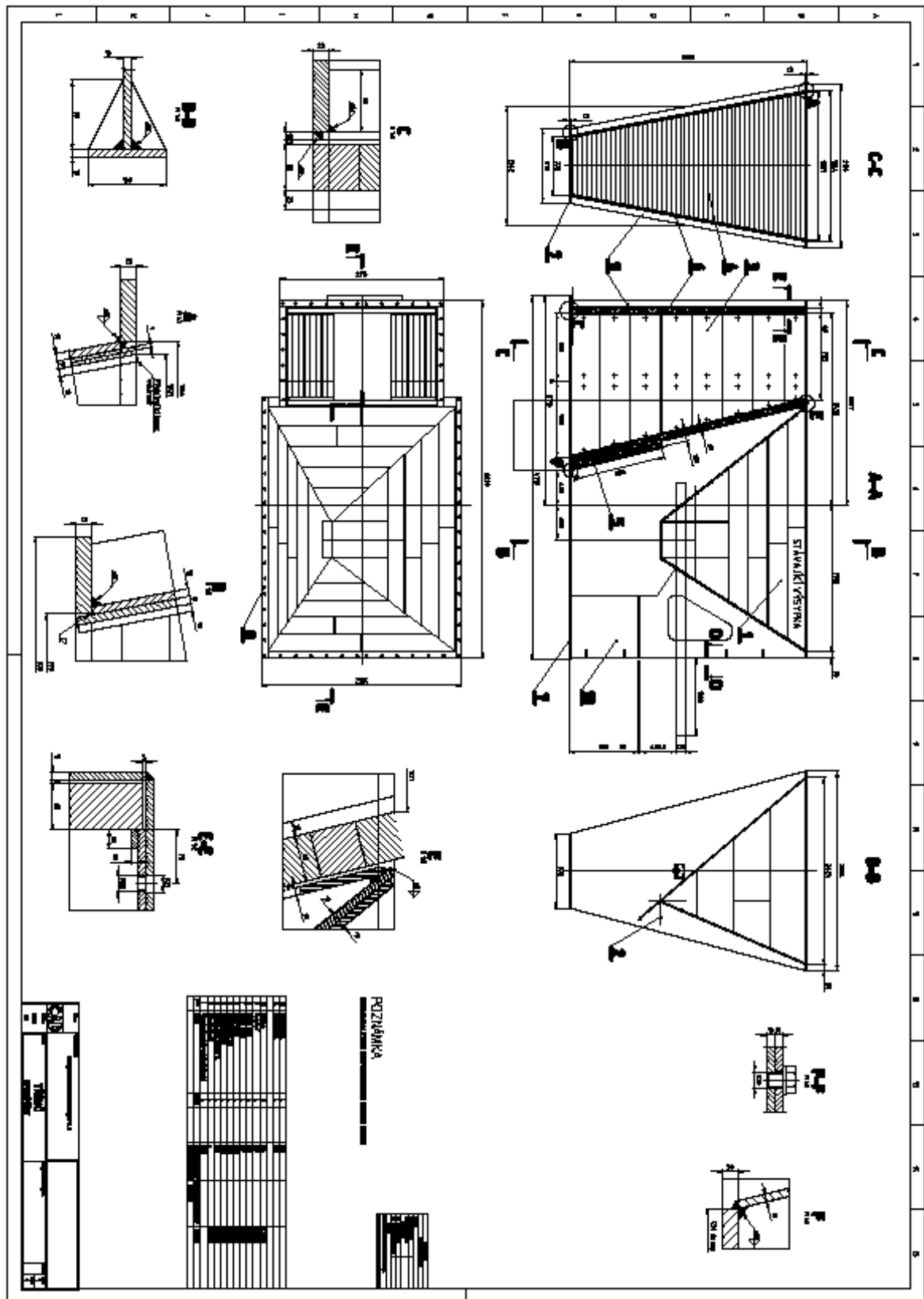


A4. Dispozice konstrukční varianty B





A6. Výkres spodní části třídiče



A7. Výkres horní části třídiče

